

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

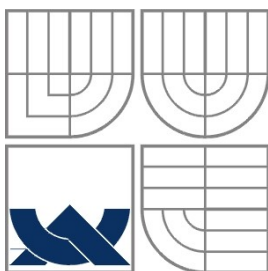
ROZBOR TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ NAPÁJENÍ DŘÁŽNÍ TRAKCE 25kV AC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

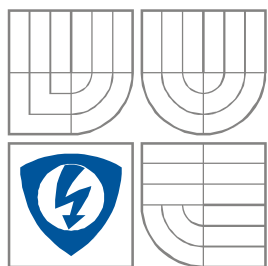
Marek Zlámal

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ROZBOR TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ NAPÁJENÍ DŘÁŽNÍ TRAKCE 25kV AC

ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR POWER SUPPLY OF TRACTION POWER LINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

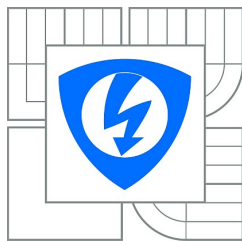
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK ZLÁMAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Marek Zlámal

Ročník: 3

ID: 98518

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Rozbor technických řešení napájení drážní trakce 25kV AC

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proved'te teoretický úvod (základní specifika napájení trakce, různé možnosti konstrukčního řešení napájecích technologií, zmapování současné nabídky napájecích technologií na trhu).
2. Proved'te rozbor technických podmínek (definice základních normativních požadavků, stanovení základních technických parametrů).
3. Popište charakteristické konstrukční celky rozváděče (silnoproudá část, systém měření, jištění a ovládání).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 30.05.2011

Vedoucí projektu: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato práce je rozbořem problematiky napájení drážní trakce s napětovou hladinou 25 kV AC. Toto jednofázové napájení má za následek celou řadu problémů, ke kterým se dále přidávají nepříznivé vlivy spojené s jednostranným napájením, deformace proudové a napětové křivky užitím stejnosměrných motorů ve starších typech lokomotiv. Text se zabývá rozvodnými zařízeními a to především kovově krytými rozvaděči, izolovanými vzduchem nebo plynem fluoridem sírovým. Podrobněji jsou rozvedena jejich konstrukční řešení, výhodami a nevýhodami jejich použití. Dále je v práci popsána metodika potřebných výpočtů pro dále uvedený praktický návrh trakčního rozváděče.

Abstract

This work is the analysis of power supply for railway lines with voltage 25 kV AC. The single-phase supply has resulted in a number of problems, such as undesirable side effects associated with the one way power supply, distortion of current and voltage curve using DC engines in olders types of locomotives. Text deals with railway electric power equipment, especially with metal enclosed switchgear, insulated with air or sulfur hexafluoride. There is been elaborated in more detail the design solutions, advantages and disadvantages of their use. Methodology of necessary calculations for designing and dimensioning of traction switchgear is described later in this text, practical example for specific conditions included.

Klíčová slova

Kovově krytý rozvaděč, trakční rozvodna, fluorid sírový, napájecí a spínací stanice, trolejové vedení, vakuový vypínač

Keywords

Metal enclosed switchgear, railway substation, Sulfur hexafluoride, power and switching station, railway power line, vacuum curcuit braker

Bibliografická citace

ZLÁMAL, M. *Rozbor technických řešení napájení drážní trakce 25kV AC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Rozbor technických řešení napájení drážní trakce 25kV AC jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

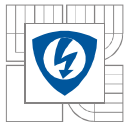
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl za odbornou pomoc poděkovat Ing. Petru Tillovi, MBA a Ing. Vítězslavu Šimáčkovi.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

1	ÚVOD	7
2	CHARAKTERISTIKY MAPĚŤOVÉ SOUSTAVY 25 kV AC	9
2.1	JMENOVITÉ NAPĚTÍ A JEHO MEZNÍ HODNOTY	9
2.2	MAXIMÁLNÍ HODNOTA NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ TRVÁNÍ	9
2.3	KMITOČET	10
2.4	ZMĚNY, PŘERUŠENÍ A ZKRESLENÍ NAPĚTÍ	11
2.5	PŘEPĚTÍ V TRAKČNÍCH ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH	12
2.5.1	VZNIK A DRUHY PŘEPĚTÍ	12
2.5.2	OCHRANY TRAKČNÍHO VEDENÍ PŘED ÚČINKY PŘEPĚTÍ	13
2.6	ZPĚTNÉ PŮSOBNÍ TRAKČNÍHO VEDENÍ NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ	14
2.7	ÚČINKY A VLIV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	17
2.7.1	KOMPENZACE ÚČINÍKU A VLIVU VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	18
3	DÍLČÍ ČÁSTI TRAKČNÍ SOUSTAVY 25 kV AC	20
3.1	NAPÁJECÍ STANICE – TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY 110/25 kV, 50 Hz AC	20
3.1.1	ROZVODNA 110 kV, 50 Hz AC	21
3.1.2	HLAVNÍ TRANSFORMÁTORY 110/27 kV, 50 Hz AC	22
3.1.3	ROZVODNA 25 kV, 50 Hz AC	23
3.1.4	SEZNAM HLAVNÍCH PŘÍSTROJŮ TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY 110/25 KV TYPU „H“	25
3.2	SPÍNACÍ STANICE	26
3.2.1	DĚLENÍ SPÍNACÍCH STANIC DLE ZPŮSOBU SPÍNÁNÍ	26
3.2.2	DĚLENÍ SPÍNACÍCH STANIC DLE JEJICH PROVEDENÍ	28
4	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ROZVODNÝCH ZAŘÍZENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	29
4.1	VEKVNÍ ROZVODNÁ ZAŘÍZENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	29
4.2	VNITŘNÍ ROZVODNÁ ZAŘÍZENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	29
4.2.1	KOBKOVÉ ROZVODNY VYSOKÉHO NAPĚTÍ	29
4.2.1.1	KOBKOVÉ ROZVODNY VYSOKÉHO NAPĚTÍ	30
4.2.2	KOVOVĚ KRYTÉ ROZVÁDĚČE	31
4.2.2.1	KOVOĚ KRYTÝ, VZDUCEM IZOLOVANÝ ROZVÁDĚČ 25 kV, 50 Hz AC	31
4.2.2.2	KOVOVĚ KRYTÝ ROZVÁDĚČ 25 kV, 50 Hz AC IZOLOVANÝ PLYNEM SF ₆	33
5	SOUČASNÁ NABÍDKA NAPÁJECÍCH TECHNOLOGIÍ NA TRHU	36
5.1	ROZVÁDĚČE IZOLOVANÉ VZDUCEM	36
5.2	ROZVÁDĚČE IZOLOVANÉ PLYNEM SF ₆	37
6	PODROBNÝ POPIS KOVOVĚ KRYTÉHO, VZDUCEM IZOLOVANÉHO ROZVÁDĚČE 25 Kv, 50 Hz AC	39
6.1	KONSTRUKČNÍ ČÁST	39
6.1.1	POLE VÝVODU / PŘÍVODU - SAN _x	40
6.1.2	POLE PODÉLNÉHO DĚLENÍ - SAS _x	42
6.1.3	POLE TRANSFORMÁTORU VLASTNÍ SPOTŘEBY - SAT _x	43
6.1.4	POLE PŘÍMÉ KOMPENZACE SACX	43
6.2	STANDARTNÍ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ	43



6.2	VARIANTNÍ PROVEDENÍ	43
7	ZÁKLADNÍ NORMATIVNÍ POŽADAVKY	46
7.1	ČSN 33 3505	46
7.2	ČSN EN 62271-200	47
7.3	DALŠÍ NORMY	50
8	ELEKTRICKÉ PARAMETRY JEDNOFÁZOVÉHO TRAKČNÍHO VEDENÍ 25 KV AC	52
8.1	PARAMETRY TRAKČNÍ SESTAVY	53
8.2	KONTROLA VEDENÍ NA ÚBYTEK NAPĚTÍ	53
8.3	KONTROLA OTEPLENÍ	57
8.4	ZKRATOVÉ PROUDY	58
9	NÁVRH ROZVÁDĚČE PRO TRAKČNÍ NAPÁJECÍ STANICI	61
10	ZÁVĚR.....	67
11	POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	68

1 Úvod

Napájení drážní trakce z veřejné distribuční sítě s frekvencí 50 Hz, a tím snížení stavebních a provozních nákladů, nebylo po dlouhou dobu realizovatelné. Důvodem byly nevyvinuté typy elektrických lokomotiv pro jednofázový proud průmyslového kmitočtu. První prototypy jednofázových lokomotiv se objevily již počátkem dvacátého století (1903). Kvůli obsaženým stejnosměrným strojům bylo nutno použít několikastupňové elektromechanické transformace energie a lokomotivy byly těžké, nevýkonné a měly jen malou účinnost. Trvalo asi dalších padesát let (1955), než technický pokrok dovolil první velkou elektrizaci jednofázovou soustavou 25 kV AC, 50 Hz, která proběhla ve Francii. Vývoj lokomotiv pro jednofázovou soustavu byl tak prudký, že od půlky padesátých let byla u všech velkých elektrizací železnic jednoznačně zvolena cesta jednofázové proudové soustavy 50Hz, nebo byla zvolena jako druhá soustava vedle stávajících stejnosměrných soustav.

Hlavními důvody pro zavedení jednofázové soustavy o kmitočtu 50 Hz byly níže uvedené výhody při budování právě těchto soustav trakčního vedení.

- Napětí soustavy 25 kV AC umožňuje oproti stejnosměrné soustavě přenášet trakčním vedením stejné výkony na větší vzdálenosti, nebo přenášet vedením větší výkony. To znamená, že vzdálenosti mezi napájecími stanicemi soustavy 25 kV AC jsou přibližně 50 až 60 km proti soustavě 3 kV DC, kde se pohybují vzdálenosti stanic mezi 20 a 25 km. Díky tomu je třeba nižšího počtu napájecích stanic pro stejnou délku vedení.
- Napájecí stanice soustavy 25 kV AC jsou vzhledem k absenci nutnosti usměrnění proudu jen prosté trakční transformovny. To znamená levnější realizace napájecích stanic.
- Trakční vedení soustavy 25 kV AC je tvořeno vodiči o menším vodičném průřezu. Nejčastěji se jedná o vodiče 100 mm² + 50 mm² oproti 150 mm² + 120 mm² u soustavy 3 kV DC při stejném výkonu traťového úseku. To znamená, že vedení je lehčí a vedle úspor na měděných vodičích jsou i levnější jejich základy a podpěry.

Vedle výhod má soustava 25 kV AC i některé nevýhody:

- Nesymetrické zatížení nadřazené trojfázové energetické sítě
- Rušení sdělovacích a zabezpečovacích zařízení
- Vysoká složitost paralelního chodu trakčních transformoven, proto je možné pouze jednostranné napájení úseků trakčního vedení. To má za následek vzdálenosti mezi napájecími stanicemi asi kolem 50 km oproti možným vzdálenostem cca 100 km.



Přes všechny nevýhody soustavy 25 kV AC a dříve i složitějších a dražších hnacích vozidel se při realizaci nových traťových úseku se při volbě způsobu napájení upřednostňuje právě tato soustava.

2 Charakteristiky napět'ové soustavy 25 kV AC

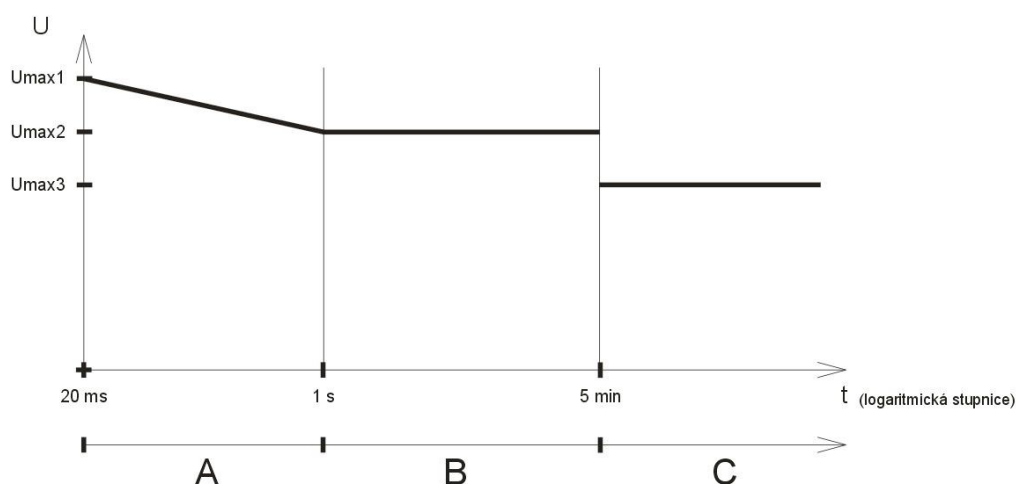
2.1 Jmenovité napětí a jeho mezní hodnoty

Jmenovité napětí	U_n	[kV]	25
Nejnižší krátkodobé napětí	$U_{\min 2}$	[kV]	17,5
Nejnižší trvalé napětí	$U_{\min 1}$	[kV]	19
Nejvyšší trvalé napětí	$U_{\max 1}$	[kV]	27,5
Nejvyšší krátkodobé napětí	$U_{\max 2}$	[kV]	29

Na napětí jsou kladeny následující požadavky, které je nutno dodržet:

- Hladina napětí mezi $U_{\min 1}$ a $U_{\min 2}$ nesmí trvat déle než 2 minuty
- Hladina napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ nesmí trvat déle než 5 minut
- Napětí naprázdno na sběrnicích napájecí stanice nesmí překročit $U_{\max 1}$
- Za normálních provozních podmínek nesmí hladina napětí klesnout pod $U_{\min 1}$ a překročit $U_{\max 2}$
- Za mimořádných provozních podmínek nesmí hladina napětí v rozmezí od $U_{\min 2}$ do $U_{\max 1}$ mít za následek žádné škody ani poruchy.
- Pokud se hladina napětí pohybuje v rozmezí $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$, musí na neupřesněný časový úsek následovat hladina nižší nebo rovna $U_{\max 1}$. Napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ smí být dosaženo pouze při krátkodobých stavech jako je:
 - rekuperační brzdění
 - přepínání u systémů pro regulaci napětí jako u mechanického přepínače odboček

2.2 Maximální hodnota napětí v závislosti na době trvání přepětí



Obr. 1 Grafické znázornění maximální hodnota napětí v závislosti na době trvání přepětí

- Pásmo A: Dlouhodobá přepětí

Změna poměru U/U_{\max} v závislosti na době trvání je dána následovně:

$$U = U_{\max} \cdot t^{-k} \quad t = \text{doba v sekundách } (0,02 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s})$$

k = koeficient uvedený v tabulce níže

- Pásmo B: Nejvyšší krátkodobé napětí $U_{\max 2}$ **- Pásmo C:** Dlouhodobá přepětí

Tabulka napětí v závislosti na době trvání přepětí:

U_n	$U_{\max 1}$	$U_{\max 2}$	$U_{\max 3}$	k
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	-
25	27,5	29	38,75	0,0741

2.3 Kmitočet

Kmitočet 50 Hz je dán trojfázovou sítí. Proto platí hodnoty uvedené v ČSN EN 50160. Za normálních provozních podmínek musí střední hodnota základního kmitočtu odpovídat rozsahu VN napájecí sítě. Frekvence se měří po dobu 10 sekund.

a) u soustav se synchronním připojením k propojené soustavě:

50 Hz \pm 1%	(49,5 Hz až 50,5 Hz)	v 99,5% roku
50 Hz + 4 %, - 6 %	(47 Hz až 52 Hz)	v 100% doby

b) u soustav bez synchronního připojení k propojené soustavě (např. napájecí soustavy na některých ostrovech)

50 Hz \pm 2%	(49 Hz až 50 Hz)	v 95% týdne
50 Hz + 4 %, - 6 %	(42,5 Hz až 57,5 Hz)	v 100% doby

V praxi je v Evropských zemích kolísání kmitočtu řízeno v menších tolerancích, než je uvedeno výše. V rámci tolerance kmitočtu pro napětí 25 kV/50 Hz hnací kolejová vozidla ve skutečnosti pracují v rozmezí od 49 Hz do 51 Hz. Jestliže se kmitočet pohybuje mimo toto rozmezí, může být výkon vozidel snížen, nebo se pohony vozidel musí odpojit.

Účinky kolísání kmitočtu mohou být provozovateli dráhy zkoušeny. Tyto zkoušky bývají prováděny proto, aby bylo zajištěno, že nebudou mít škodlivý vliv na zabezpečení jízdy vlaku.

2.4 Změny, přerušení a zkreslení napětí

a) Rychlé změny napětí

Rychlé změny napětí v rozmezí stanoveném v tabulce jsou pro drážní elektrifikační síť typické a jsou důsledkem změn trakčního zatížení, konfigurace trakční napájecí sítě a konfigurace veřejné nebo drážní napájecí sítě.

b) Krátkodobé poklesy napětí trakčního vedení

Krátkodobé poklesy napětí jsou způsobeny poruchami v trakčním vedení nebo ve veřejné distribuční soustavě. Doba trvání většiny krátkodobých poklesů napětí bývá kratší než 1 s a velikost poklesu je menší než polovina jmenovitého napětí.

c) Krátkodobá přerušení napětí

Za normálních provozních podmínek jsou krátkodobá přerušení napětí obvykle způsobena činnostmi při vypínání a při automatickém opětovném zapínání jističů (automatických vypínačů) po zjištění poruchy. Počet krátkodobých výpadků dodávky napájecího napětí se pohybuje od několika desítek až do několika set za rok. U přibližně 70 % krátkodobých přerušení napájecího napětí je doba trvání kratší než 10 s.

d) Dlouhodobá přerušení napětí

Náhodná přerušení jsou obvykle způsobena vnějšími vlivy, činnostmi, kterým správce infrastruktury nemůže předejít a v některých případech i selháním lidského faktoru. Typické hodnoty trvání dlouhodobých přerušení nelze určit. Za normálních provozních podmínek se četnost přerušení napájecího napětí, trvajících déle než tři minuty, obvykle pohybuje v řádu jednotek za rok. Určující hodnoty pro předem dohodnutá přerušení nejsou uvedeny, protože tato přerušení jsou předem ohlášena.

e) Krátkodobé poklesy napětí trakčního vedení

Krátkodobé poklesy hladiny napětí jsou způsobeny poruchami v trakčním vedení nebo ve veřejné distribuční soustavě. Doba trvání většiny krátkodobých poklesů napětí je kratší než 1 s a velikost poklesu je menší než polovina jmenovitého napětí.

f) Zkreslení

Napětí je zkresleno nesouměrným zatížením daným trakčními a přídatnými zařízeními, měnícími a veřejnou distribuční soustavou. Následkem těchto nesymetrií jsou nízké a vysoké kmitočty harmonických, které mohou mít (přechodné) fázové posunutí a jiný průchod nulou.

2.5 Přepětí v trakčních elektrických zařízeních

2.5.1 Vznik a druhy přepětí

Přepětí je přechodný jev, kdy napětí překročí hodnotu jmenovitého napětí sítě a může mít různý charakter dle příčiny vzniku. Přepětí rázového charakteru může trvat i pouze několik mikrosekund a nabývat extrémních hodnot a může být proto nebezpečné pro izolaci elektrického zařízení napájecích stanic, elektrických hnacích vozidel i samotného vedení. Při vysokých hodnotách přepětí je elektrické trakční zařízení vystaveno silným dielektrickým namáháním izolace, kdy tyto jevy mohou mít za následek průraz nebo přeskok. Elektrický průraz nebo přeskok funguje tak, že se nejprve výbojovým proudem napětíové vlny ionizuje průrazná či přeskoková dráha, poté již stačí k udržení oblouku zkratového proudu jmenovité napětí sítě až do okamžiku vypnutí.

Dle způsobu vzniku se přepětí dělí na vnější a vnitřní. Vnitřní přepětí vznikají vypínacími pochody, poruchami nebo chybou obsluhy zařízení. Vnější přepětí mají jsou elektrostatického původu a jejich příčinou bývají obvykle atmosférické vlivy. Šíří se v podobě nábojové vlny vedením. Čelo napětíové vlny se zmenšuje s rostoucí vzdáleností od místa vzniku, přitom ale může nabýt až dvojnásobné odrazem při náhlém zvýšení vlnového odporu vedení například na konci vedení.

Vnější přepětí

Blesk je elektrický výboj, který se skládá z celé řady následujících výbojů v časových intervalech 40 – 100 μs . Amplituda bleskového výboje se v našich podmínkách pohybuje u poloviny blesků nad hodnotou 20 kA, u jedné desetiny přesahuje 60 kA a u jednoho procenta blesku se hodnota amplitudy dostává až nad 100 kA, přičemž polarita je z devadesáti procent záporná. Energie blesku je až 20 coulomb, což odpovídá asi 20 As. Energie to není velká, ale pokud se vezme v úvahu velká strmost a krátká doba trvání, má za následek značné dynamické účinky.

Nicméně pravděpodobnost přímého úderu blesku do trakčního vedení je velice malá. Pravděpodobnější jsou v tomto případě úderu stožárů vedení, které musí být opatřeny kvalitním svodem s co nejnižší impedancí a to především reaktancí, dimenzovaný na velké krátkodobé proudové nárazy. Maximální napětí v místě úderu blesku závisí na vlnové impedanci svodu. Dalším faktorem, který má vliv na velikost přepětíové vlny v důsledku nepřímého úderu blesku, je strmost nárůstu bleskového proudu, které se pohybuje mezi 10 až 30 kA. μs^{-1} .

V případě přímého úderu blesku do vedení vzniká znatelně vyšší přepětíová vlna než v druhém případě. V takovém případě je následkem přeskok na nejbližším izolátoru a rázové

přeskokové napětí izolátoru pak definuje vlastní vrcholovou hodnotu přepětí, které se bude šířit vedením. Kvůli výše uvedeným skutečnostem jsou všechny přístroje dimenzovány na izolační hladinu 35 kV.

Dalším jevem, který má za následek přepětíovou vlnu je takzvané uvolnění vázaného náboje v trakčním vedení. V mracích je tvořen elektrický náboj, který v trakčním vedení váže náboj opačné polarity. Vybitím náboje z mraku (úderem blesku daleko od trakčního vedení) je uvolněn i náboj v trakčním vedení. Tato náhlá změna má za následek vznik přepětíové vlny, která se šíří dál vedením.

Vnitřní přepětí

Rozvod trakčního proudu se realizuje jednovodičovým izolovaně zavěšeným vedením, dále zpětným uzemněním kolejnicovým vedením se zpětným kabelem. Tato soustava tvoří velkou smyčku, ve které působením trakčního proudu vzniká magnetické pole o velké energii. Při vypínání vedení se část magnetické energie mění v teplo ve vypínacím oblouku vypínače a s náhlým zánikem magnetického pole se ve vedení indukuje napětí, které způsobuje napětíovou vlnu ve vypnutém vedení. Největší přepětíová vlna vzniká při nejvyšších hodnotách průchozího proudu, tedy při vypínání proudů zkratových. V porovnání s vnějšími přepětími dosahují ta vnitřní nižších hodnot v řádu jednotek násobků napětí jmenovitého. Na druhou stranu ale mají nepoměrně delší dobu trvání a tím i mnohonásobně vyšší energii a také se vyskytují častěji než přepětí vnější.

2.5.2 Ochrana trakčního vedení před účinky přepětí.

Účelem přepětíových ochran je odvedení přepětíových rázů, vln a výbojů do země a tím ochránit izolační stav celého systému před průrazem nebo přeskokem a tím před následným zkratovým proudem.

Prvky přepětíových ochran:

- růžkové bleskojistky
- ventilové bleskojistky

Růžkové bleskojistky

Tato ochranná zařízení jsou vybavena jiskřištěm a řadí mezi hrubé ochrany. Jakmile je tento prvek přepětím uveden v činnost, vytvoří zkrat, který má za následek vypnutí daného úseku trakčního vedení. Umisťují se do míst trakčního vedení, kde se mění impedance a tím vzniká místo odrazu přepětíových vln. Těmito místy jsou například začátky nebo konce vedení. Dále se umisťují v místě přechodu mezi venkovním a kabelovým vedením.

Ventilové bleskojistky

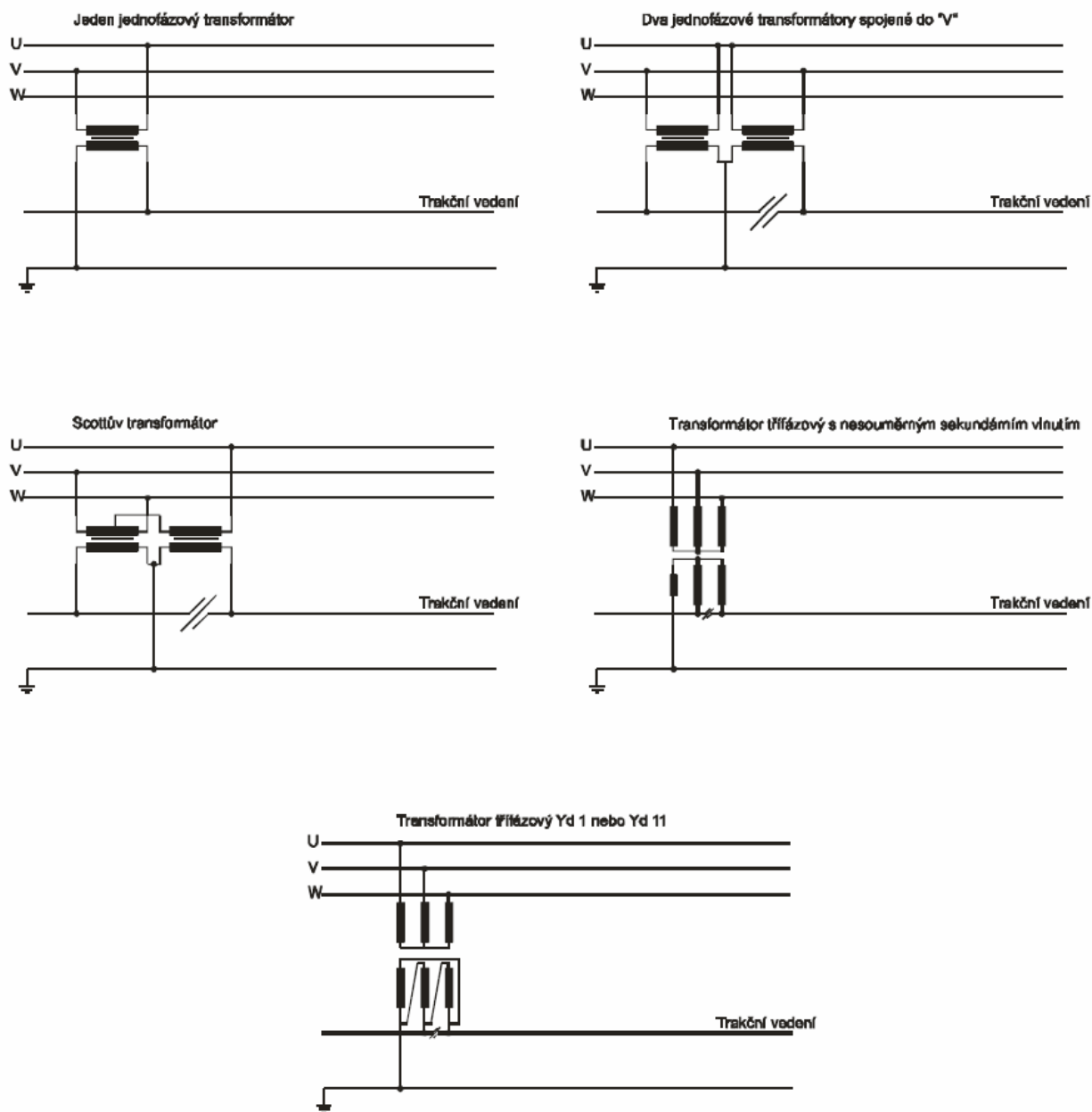
Jsou vybaveny jemným jiskřištěm spolu s tlumicím odporem s nelineární proudově závislou charakteristikou. Tyto nelineární odpory mají polovodičový charakter, přičemž jejich odpor klesá s rostoucí hodnotou přiloženého napětí a tím úbytek napětí průchodem proudu neroste lineárně s velikostí proudu a je možné ho udržet na hodnotě, která je pod izolační hladinou chráněného zařízení. Svodiče jsou dimenzovány až na 50 kA.

2.6 Zpětné působení trakčního vedení na distribuční síť

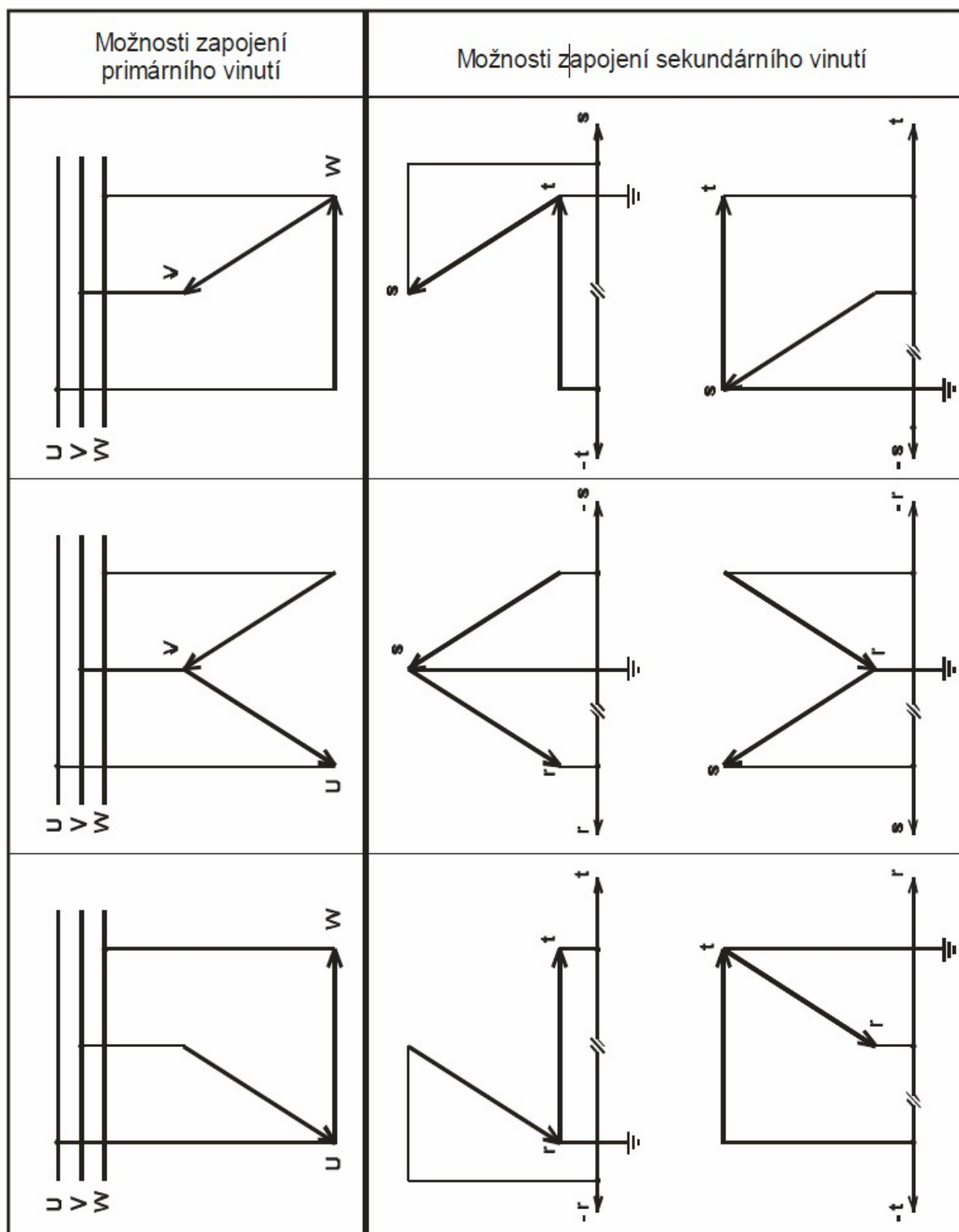
Napájení trakčního vedení jedním jednofázovým transformátorem připojeným ke dvěma fázím sítě 110 kV je nejjednodušší způsob, který ale představuje velké technické potíže. Jednofázový odběr výkonu v napájecích trakčních transformovných znamená narušení symetrického zatížení v trojfázové energetické síti 110 kV. To má za následek vznik napěťových nesymetrií v síti 110 kV, vznik vyrovnávacích proudů v tlumících vinutích generátorů, vznikem třetí harmonické a zmenšeným využitím výkonu transformátoru a vedení. Pro velikost nesouměrného zatížení jsou dána určitá limitující kritéria, která je nutno dodržet, proto se systémem napájení trakčních vedení a zapojením transformoven snažíme dosáhnout souměrného zatížení všech tří fází energetické sítě 110 kV. Toho lze dosáhnout několika způsoby.

- Zmírnění nesymetrie v odběru energie z trojfázové energetické sítě 110 kV lze docílit cyklickým střídáním odběrové fáze na primární straně transformátorů v napájecích stanicích.
- Napájením trakčního vedení dvěma jednofázovými transformátory. Každý z nich je připojen ke dvěma různým fázím trojfázové sítě 110 kV tak, že tvoří takzvané spojení do „V“, někdy nazývané také spojení do otevřeného trojúhelníka (podle vektorového zobrazení).
- Napájením Scottovým transformátorem. Tento transformátor speciální konstrukce symetricky zatěžuje trojfázovou síť.
- Napájením třífázovým transformátorem s nesouměrným sekundárním vinutím. Za podmínky stejné jednofázové zátěži trakčního vedení symetricky zatěžuje trojfázovou síť.
- Napájením třífázovým transformátorem ve spojení Yd 1, případně Yd 11.

Schémata zapojení výše uvedených transformátorů jsou znázorněny v obrázku 3. Možnosti zapojení vinutí dvou jednofázových transformátorů do V jsou pak podrobněji vyobrazeny v obrázku 4.



Obr. 2 Způsoby zapojení transformátorů trakčních napájecích stanic



Obr. 3 Vektorové diagramy zapojení vinutí napájecích transformátorů ve spojení do „V”

2.7 Účinník a vliv vyšších harmonických

Kvalita odebírané elektrické energie z distribuční sítě 110 kV je dána účinníkem první harmonické proudu a součinitelem deformace proudového průběhu. Součinitel deformace je způsoben vyššími harmonickými proudy. Součinem obou výše uvedených faktorů získáme faktor výkonu, který vyjadřuje poměr činného a zdánlivého výkonu

$$\lambda = v \cdot \cos \varphi = \frac{U_{ef} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{I_{ef} \cdot U_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cdot \cos \varphi_1$$

λ – faktor výkonu

v – součinitel deformace proudové křivky

φ – účinník

Předpokládejme lokomotivu vybavenou dvoupulsním usměrňovačem. Liché harmonické nabývají mnohem vyšších hodnot než sudé, proto lze součinitel deformace proudové křivky vyjádřit jako podíl výkonu první harmonické P_1 a zdánlivého výkonu součtu proudových složek P_2 . Hodnota součinitele se pohybuje v rozmezí od 0,9 do 0,92.

$$v = \frac{P_1}{U \cdot \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_{2n-1}^2}} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + D^2}}$$

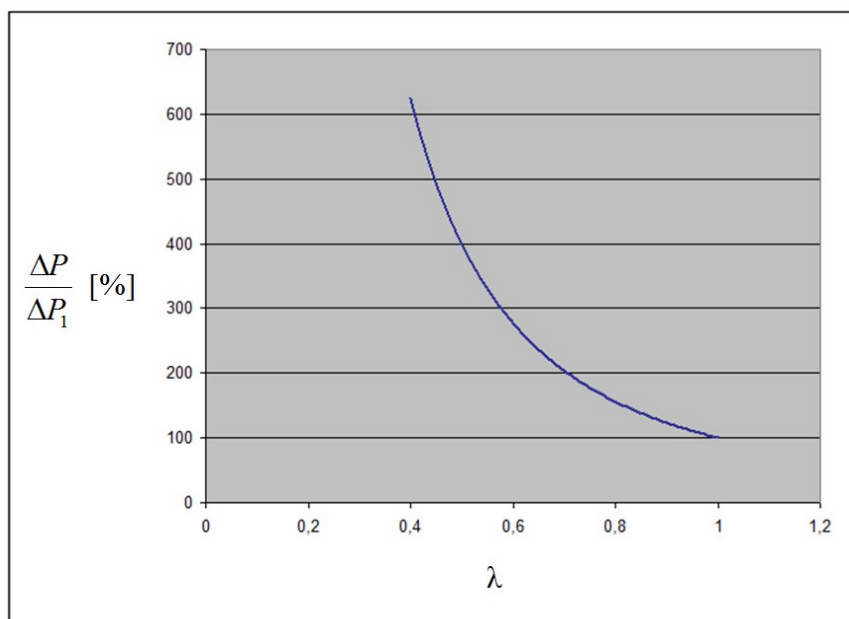
P_1 – činný výkon první harmonické

D – součtový zdánlivý výkon vyšších lichých harmonických

Z následujících vztahů pak vyplývá, že ztráty v mědi transformátorů a vedení rostou s druhou mocninou, jak je znázorněno na obrázku číslo 4.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_1}{\lambda^2} \quad \rightarrow \quad \lambda = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P}}$$

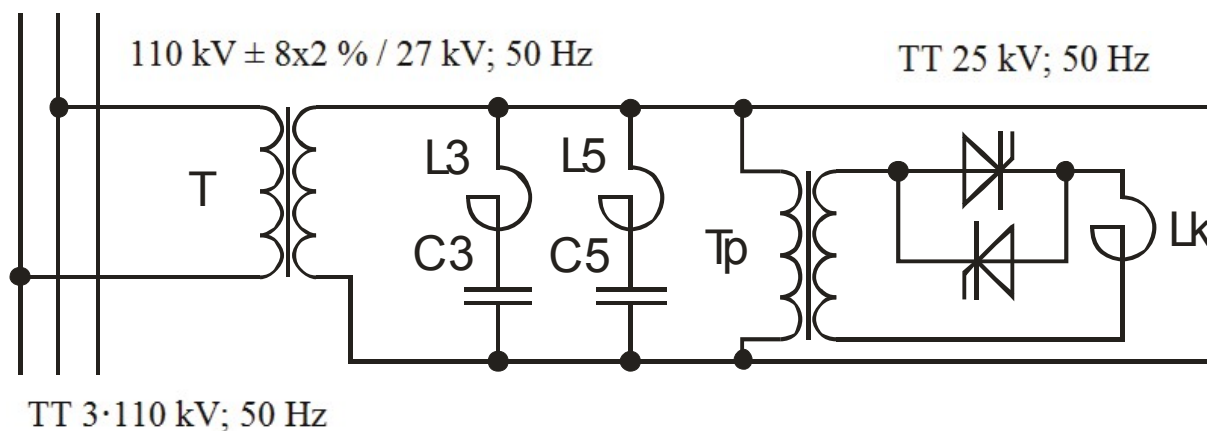
V provozních podmínkách, kdy se faktor výkonu může pohybovat v rozmezí 0,6 až 0,8, lze vyčíst z grafu, že ve vodičích vznikají přídavné ztráty až 277,78 % činného výkonu.



Obr. 4 Vliv faktoru výkonu na ztráty v mědi

2.7.1 Kompenzace účinníku a vlivu vyšších harmonických a

Výše uvedené negativní vlivy se kompenzují filtračně kompenzačním zařízením. Tato zařízení jsou instalována v síti Českých Drah 25 kV AC. Obsahuje dvě paralelně řazené sériové rezonanční LC větve laděné na kmitočtech dominantní třetí a páté harmonické základního kmitočtu, tedy na 150 Hz a 250 Hz. Zařízení je dále vybaveno paralelně připojenou větví dekompenzačního členu, který obsahuje snižovací transformátor, dekompenzační tlumivku a tyristorový regulátor.



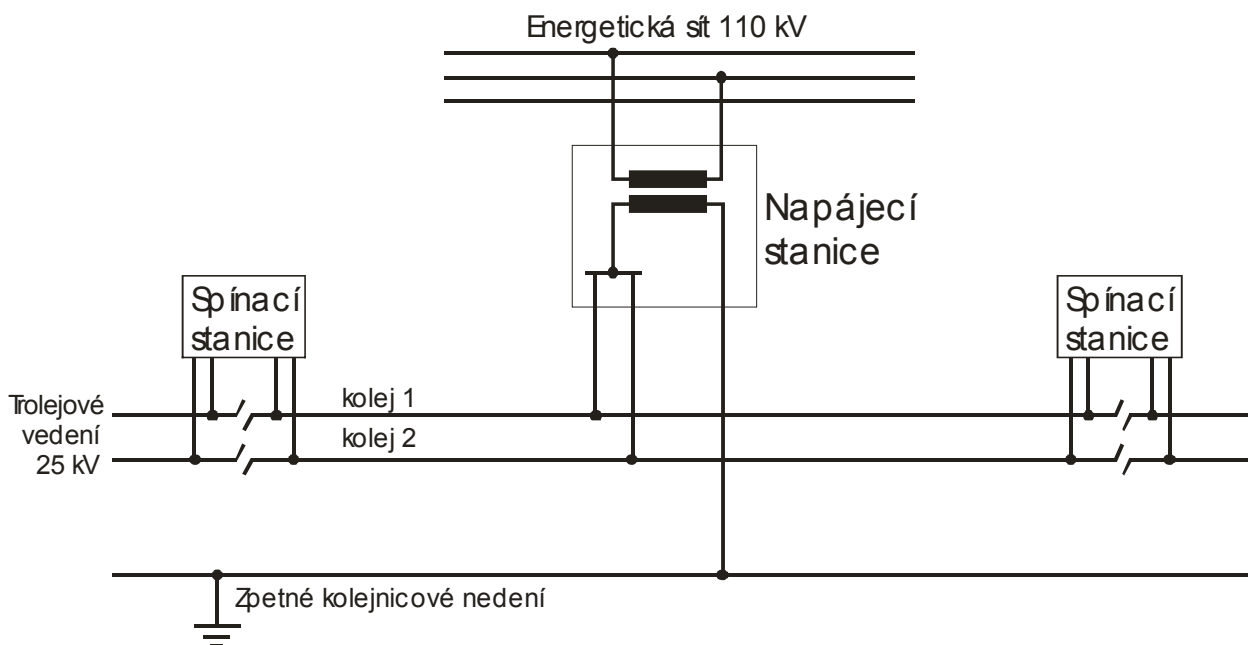
Obr. 5 Schéma filtračně kompenzačního zařízení

Funkcí sériových rezonančních filtrů je filtrace třetí a páté harmonické proudu. Zároveň jsou zdrojem konstantního kapacitního kompenzačního výkonu pro první harmonickou. Filtry jsou přímo napojeny na trakční vedení 25 kV AC a mohou být provedení jak venkovního tak i vnitřního.

Kompenzační člen kompenzuje proměnlivý jalový příkon plynule regulovatelným indukčním jalovým výkonem kompenzačního členu a konstantního kapacitního jalového výkonu filtrů. Hlavními prvky kompenzačního členu jsou jednofázový snižovací transformátor s výstupním napětím 10 kV a kompenzační reaktor. Dále je vybaven antiparalelně zapojenými tyristory a regulátorem.

Nedávno se na trhu objevily filtračně kompenzační zařízení s měniči, které lze připojit na plné napětí trakčního vedení. Tím odpadá nutnost použití pomocného snižovacího transformátoru, což přináší úsporu v podobě nižších pořizovacích i provozních nákladů. Snižovací transformátor je častým zdrojem poruch, jejichž odstranění bývá pracné a také nákladné.

3 Dílčí části trakční soustavy 25 kV AC



Obr. 6 Základní schéma napájení trati 25 kV

3.1 Napájecí stanice – trakční transformovny 110/25 kV, 50 Hz AC

Tyto stanice se umísťují v blízkosti železničních stanic z důvodu lepší dostupnosti pro dopravu těžkých transformátorů. Pokud je třeba, trakční napájecí stanice se budují ve společném prostoru s opravnou a údržbou trakčního vedení. Toto řešení přináší úspory v podobě společné energetické přípojky, kanalizace, přístupové cesty, apod.

Trakční transformovna se skládá z následujících částí:

- Rozvodna 110 kV, 50 Hz
- Regulační transformátory $110 \pm 8 \cdot 2 \% / 27 \text{ kV}$, 50 Hz, obvykle 10 až 16 MVA
- Rozvodna 25 kV, 50 Hz
- Řídicí, ochranné a pomocné zařízení ve velínu pomocné budovy včetně zdroje NN z místní sítě, nebo z transformátoru vlastní potřeby.

3.1.1 Rozvodna 110 kV, 50 Hz AC

Je to trojfázová rozvodna nejčastěji venkovního provedení. Alternativou k venkovní rozvodně je rozvodna zapouzdřená, které se ale nepoužívají tak často. Nejčastěji se budují rozvodny typu H (popis rozvodny je uveden níže). Rozvodna obsahuje výkonové vypínače, třípólové odpínače s uzemňovacími kontakty, přepětovou ochranu ventilovými svodiči a měřicí transformátory. Veškerá signalizace spínání a poruch, ovládání spínacích přístrojů a měření je prováděna z velína.

Typické hodnoty rozvoden 110 kV:

- nejvyšší a nejnižší napětí sítě 127/97 kV
- nejnižší střídavé napětí zápalné 170 kV
- nejvyšší napětí rázové 327 kV

Typy rozvoden

Typy rozvoden 110 kV jsou odvozeny ze skutečnosti, že trakční transformovny bývají ve většině případů osazeny dvěma nebo třemi transformátory. Níže popsané typy rozvoden se vzájemně liší způsobem připojení k síti 110 kV. Připojení bývá nejčastěji provedeno zasmyčkováním. Další možností je přípojka typu T.

- Trakční transformovna s rozvodnou ve tvaru H

Rozvodna obsahuje dva transformátory, vypínače v přívodech 110 kV pro připojení zasmyčkováním přívodního vedení a také v přívodech k transformátorům. Tento typ rozvodny je nejlépe vyzbrojen a jeho použití je nejčastější.

- Trakční transformovna s rozvodnou ve tvaru H se třemi trakčními transformátory

Jelikož je vybavena třemi transformátory, je její použití vhodné v místech, kde je potřeba napájet i odbočující tratě. Každý transformátor může být připojen k jiným fázím. Připojení transformovny k energetické síti se provádí zasmyčkováním vedení 110 kV.

- Trakční transformovna s předsunutými transformátory a zkratovači

Toto řešení je vhodné pro napájení samostatným vedením z větší energetické rozvodny 110 kV. Na straně 110 kV je instalována pouze nejnutnější výzbroj. Veškeré ostatní přístroje se nacházejí v příslušných vývodových polích energetické rozvodny. Zkraty jsou vypínány vypínači v rozvodně po zapůsobení zkratovačů, není proto třeba kabelového spojení s energetickou rozvodnou. Není-li zkratovač použit, je třeba přenášet impulsy k vypnutí zvláštním kabelovým vedením. Toto řešení je vhodné pouze pro malé vzdálenosti mezi trakční transformovnou a rozvodnou energetiky.

- Trakční transformovna jednořadová s dvojími přípojnici

Buduje se tam, kde je v budoucnu naplánováno rozšíření rozvodny 110 kV. Pro připojení k vedení 110 kV zasmyčkováním se transformovna vybavuje příčným spínačem přípojníc. Pokud tak není a není vybavena ani odpojovači v přívozech, připojuje se rozvodna dvojitou přípojkou T.

Nejčastěji užívaná rozvodna typu H je schematicky vyobrazena na obrázku číslo 7 na straně 23.

3.1.2 Hlavní transformátory 110/27 kV, 50 Hz AC

Nejčastěji se v transformovně užívají dva regulační jednofázové transformátory připojené na dvě fáze primárního trojfázového systému. Transformátory jsou dimenzovány tak, že tvoří vzájemnou zálohu, na straně VVN jsou regulovatelné v rozsahu $\pm 8,2 \%$ k vyrovnaní změn napětí v síti 110 kV. Jedná se o transformátory olejové s chlazením na principu přirozeného proudění vzduchu na povrchu nádoby s možností nuceného proudění ventilátory pro případ vyššího zatížení.

Hlavní technické parametry nejčastěji používaného jednofázového transformátoru:

primární napětí	110 kV $\pm 8,2 \%$ 50 Hz
sekundární napětí (naprázdno)	27 kV, 50 Hz
jmenovitý trvalý výkon s přirozeným chlazením	10 MVA
trvalý výkon se zesíleným chlazením	13,5 MVA
ztráty naprázdno	23 kW $\pm 15 \%$
ztráty nakrátko	117 kW $\pm 15 \%$
napětí nakrátko	13 % $\pm 10 \%$
hmotnost	41,57 t

Výkon transformátoru se volí dle intenzity dopravního toku a vzdálenosti napájecích stanic. Úseky trakčního vedení jsou napájeny jednostranně z napájecích stanic přibližně do poloviny vzdálenosti od sousední napájecí stanice. Při specifické spotřebě 25 Wh/t·km a součtovém dopravním toku 10^6 t/rok, jsou voleny následující jmenovité výkony transformátorů.

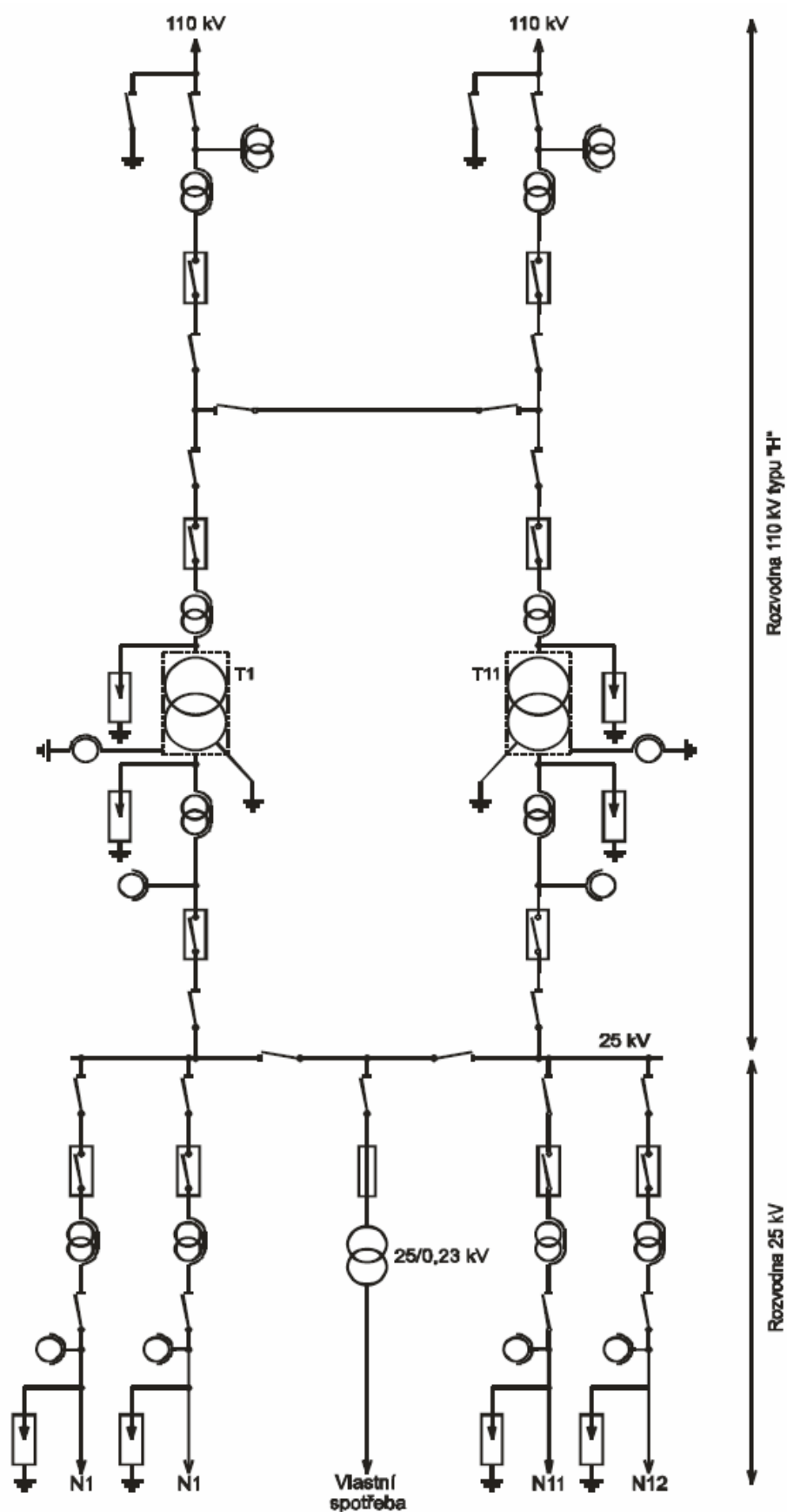
Roční dopravní tok $\cdot 10^6$ [t/rok]		15	20	30	40	40	50	60	70
S	MVA	6,5	8	10	13,5	2·6,5	2·8	2·10	2·13,5

3.1.3 Rozvodna 25 kV, 50 Hz AC

Jedná o jednořadovou či dvouřadovou s minimálně sedmi poli – dvě jsou pro přívod od hlavních transformátorů, dvě pole jsou pro napáječe trakčního vedení, jedno pole pro transformátor vlastní spotřeby a dvě pole jsou záložní pro kompenzaci účinníku nebo pro druhý transformátor vlastní spotřeby.

Přípojnice je podélně dělená dvěma odpínači, které umožňují různé kombinace buď z jednoho, nebo z obou hlavních transformátorů ze dvou fází a připojení vlastní spotřeby k jednomu z transformátorů. Rozvodny jsou dále vybavena výkonovými vypínači, transformátory vlastní spotřeby, měřicími transformátory. Všechny přístroje jsou dimenzovány pro izolační hladinu 35 kV.

Typické řešení rozvodny je schematicky vyobrazeno na obrázku číslo 7 straně 23.



Obr. 7 Základní schéma trakční napájecí stanice 110/25 kV, 50 Hz

3.1.4 Seznam hlavních přístrojů trakční transformovny 110/25 kV typu H

Rozvodna 110 kV

- čtyři trojpólové odpojovače ve třífázové části rozvodny (dva mají zemnicí nože)
- dva dvojpólové výkonové vypínače v přívodech k hlavním transformátorům
- dva dvojpólové odpojovače v přívodech k hlavním transformátorům
- dva jednopólové vypínače v přívodech do rozvodny 25 kV
- dva jednopólové odpojovače v přívodech do rozvodny 25 kV
- šest měřicích transformátorů proudu
- šest měřicích transformátorů napětí
- čtyři svodiče přepětí před a za hlavními transformátory
- dva jednofázové hlavní transformátory

Rozvodna 25 kV

- dvě pole přívodu napětí z trakčních transformátorů
- čtyři pole trakčních napáječů
- jedno pole transformátoru vlastní spotřeby
- dvě pole filtrační kompenzačního zařízení

Všechny následující přístroje použité v rozvodně 25 kV jsou jednopólové.

- čtyři výkonové vypínače trakčních napáječů
- jedenáct odpojovačů
- výkonová pojistka transformátoru vlastní spotřeby
- čtyři svodiče přepětí
- čtyři měřicí transformátory proudu
- čtyři měřicí transformátory napětí

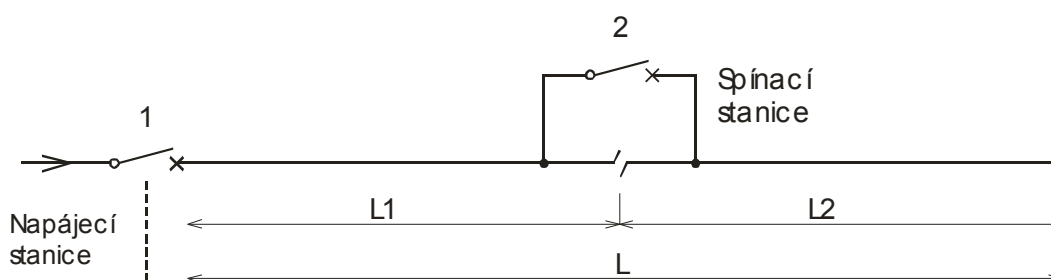
3.2 Spínací stanice

Spínací stanice je pevné elektrické trakční zařízení, které slouží k napájení jednotlivých úseků vedení, přičemž musí zaručit selektivitu vypínání zkratových proudů. To znamená, že při poruchovém stavu některého z napájených úseků je odpojen pouze tento úsek, přičemž zbytek soustavy zůstal v provozu. Další funkcí spínací stanice je umožnění dvoustranného napájení trakčního vedení, kdy se spínací stanice umístí mezi dvě napájecí stanice a umožňuje tak paralelní spolupráci daných napájecích stanic.

3.2.1 Dělení spínacích stanic dle způsobu spínání

Spínací stanice podélné

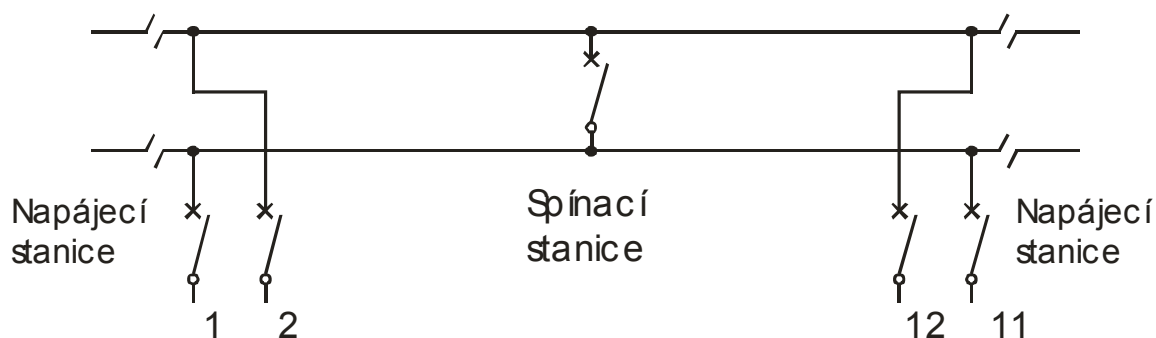
Jedná se o nejjednodušší typ spínací stanice, který se používá především na jednokolejných tratích, kde se umísťuje doprostřed mezi dvě napájecí stanice. Je vybavena vypínačem, který vlivem nadproudové ochrany vypíná zkratové proudy. Stanice je zapínána automaticky, je-li na obou stranách trakčního vedení elektrické napětí. Podélné spínání nemění ve vedení napěťové ani proudové poměry, zato zlepšují zkratové poměry.



Obr. 8 Podélné spínání

Spínací stanice příčné

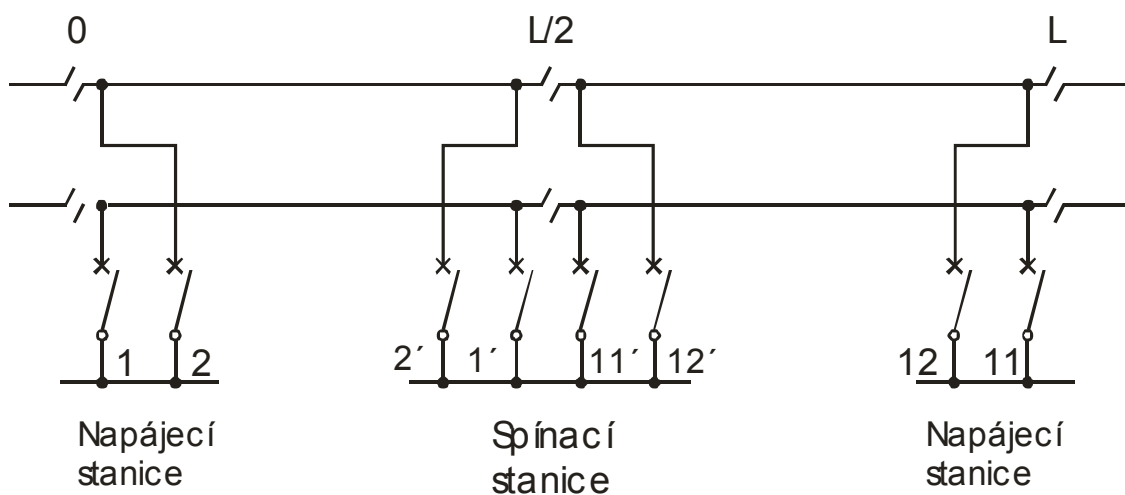
Tyto stanice spojují trakční vedení dvou i více kolejí. Stanice je vybavena jedním vypínačem, který spíná trakční vedené příčně. Stanice vypíná při absenci elektrického napětí na obou stranách a stejně jako stanice podélná vypíná vlivem nadproudové ochrany zkratové proudy a automaticky spíná, je-li na obou stranách trakčního vedení elektrické napětí. Tyto stanice jsou používány snížení úbytků napětí a tím i energetické ztráty na úsecích trakčního vedení, kde má trať jednostranný sklon nebo při vysoce nesymetrickém zatížení kolejí. Příčné spínání trakčního vedení vede k příznivějšímu rozdělení proudů na jednotlivé napáječe a tím mění proudové i napěťové poměry, přičemž ale zhoršují zkratové poměry.



Obr. 9 Příčné spínání

Spínací stanice kombinované

Jedná se o kombinaci podélného a příčného spínání. Nejčastěji je tento typ používán na dvoukolejných tratích, kde se spínací stanice umísťuje v polovině délky mezi sousedními napájecími stanicemi. Tento způsob spínání je nejvýhodnější, protože spojuje výhody obou způsobů uvedených výše. Používá se dvou způsobů zapojení a to uzlové nebo čtyřúhelníkové. Druhý jmenovaný způsob je používán mnohem častěji, kdy při zkraty je vypnut podélný i příčný vypínač



Obr. 10 Kombinované spínání

Spínací stanice speciální

Tyto stanice mají nejrůznější zapojení dle účelu použití a jsou budovány v místech velkých železničních uzlů, přípojných tratí, lokomotivních dep a podobně.

3.2.2 Dělení spínacích stanic dle jejich provedení

Spínací stanice jednovypínačové

Ať už se jedná o stanice podélné nebo příčné, jsou jednotného provedení. Stanice jdou stožárového provedení, kde hlavní vypínače spolu s vypínačem jsou umístěny na konstrukční lávce dvojce betonových stožárů. Prvky spínací stanice jsou stejného typu jako v rozvodnách 25 kV napájecích stanic.

Spínací stanice vícevypínačové

Nejčastějším typem vícevypínačové stanice je její varianta pro dvojkolejně tratě s kombinovanými stanicemi vybavenými čtyřmi vypínači ve čtyřúhelníkovém zapojení. Tyto spínací stanice jsou vybaveny rozvodnou 25 kV, která obsahuje čtyři pole s vypínači, kdy každé pole obsahuje dále dva odpojovače, měřicí transformátor proudu a napětí, bleskojistku. Dalším vybavením je řídicí část stanice.

4 Konstrukční řešení rozvodných zařízení vysokého napětí

Rozvodná zařízení lze principiálně rozdělit na dvě hlavní skupiny, a to na zařízení venkovního a vnitřního provedení.

4.1 Venkovní rozvodná zařízení vysokého napětí

Venkovní provedení je sice levnější z hlediska stavebních nákladů, má ale řadu nevýhod.

Mezi výhody se řadí například větší volnost při návrhu, provádění změn na zařízení, přehlednost uspořádání a snadný přístup k přístrojům.

Nevýhodami venkovních zařízení je jejich velká náročnost na stavební prostor. Tou největší nevýhodou je ovšem vystavení veškerého vybavení rozvodny venkovním povětrnostním vlivům, které mají za následek snížení izolační hladiny zařízení. Povětrnostními vlivy je myšlen například déšť, námraza, znečištění ovzduší prachem, popílkem, a podobně. Zařízení musí bezpečně odolat i extrémním podmínkám.

Bezporuchový provoz lze zajistit následovně:

- zvýšením izolační hladiny
- vhodným výběrem izolátorů
- hydrofobními nátěry
- čištěním zařízení (v beznapěťovém stavu, nebo ostřikem vodou za běžného provozu), což ovšem znamená nutnost pravidelné údržby.

Z důvody výše uvedených nevýhod se od budování venkovních rozvoden pro napájení drážní trakce 25 kV AC upustilo a bylo nahrazeno užitím rozvoden vnějších.

4.2 Vnitřní rozvodná zařízení vysokého napětí

4.2.1 Kobkové rozvodny vysokého napětí

Výhodou kobkových rozvodných zařízení je umístění přístrojového vybavení rozvodny do krytých prostor. Tím je docíleno ochrany přístrojů před povětrnostními vlivy venkovního prostředí. Mezi pozitiva se dále řadí přehlednost, ochrana před šířením poruchy, a také snadná údržba a vizuální kontrola přístrojů.

Nevýhodou je nižší stupeň ochrany pracovníků obsluhy před nebezpečným dotykovým napětím, a dále značný obestavěný prostor, čímž se zvyšují pořizovací náklady. Cestou, jak snížit tyto náklady, je co největší podíl prefabrikovaných dílů užitých při výstavbě. Proto se vyrábí již v

předpřípravě takové součásti, jako jsou dveře, přístrojové nosné konstrukce, ovládací skříně, ale například i nehořlavé mezistěny.

Kobkovou rozvodnou jsou myšleny samostatné prostory, ve kterých jsou na patkách, závěsech a jiných konstrukcích umístěny přípojnice a přístrojové vybavení odboček. Jednotlivé odbočky se nacházejí v prostoru, který je oddělen minimálně ze dvou stran nehořlavými stěnami. Na přední straně kobky se nacházejí ovládací, měřicí a signalizační prvky, nebo je kobka znepřístupněna zábranou (například drátěné pletivo). Přípojnice jsou řešeny jako holé hliníkové nebo (nověji) měděné pásovinové vodiče, které se umísťují mimo dosah pracovníků obsluhy, dle příslušných norem.

4.2.1.1 Dělení kobkových rozvodů dle výškového rozdělení prostoru

Dvoupodlažní

Tyto kobkové rozvodny se dále dělí na následující typy.

- Rozvodny s nástěnnými kobkami

Rozvodna má jediný systém přípojníc, které jsou umístěny v horním podlaží spolu s vypínači a ovládací skříní. Ve spodním podlaží se nachází vývodové odpojovače kabelových vývodů, kabelové koncovky, měřicí transformátory napětí, měřicí transformátory proudu. Měřicí transformátory proudu mohou být jak v prvním tak i v druhém podlaží, nebo se použijí průchodkové měřicí transformátory proudu, umístěné mezi prvním a druhým podlažím.

- Rozvodny s kombinovaným umístěním kobek

Rozvodna obsahuje dvě sady přípojníc a dva typy kobek. Na hlavní přípojnici se připojují kobky volně stojící a na pomocné přípojnice jsou napojeny nástěnné kobky.

- Typ A

Ve spodním podlaží jsou umístěny vypínače, ovládací skříně, vývodové odpojovače kabelových vývodů, měřicí transformátory napětí a proudu. V horním podlaží se nachází hlavní a pomocné přípojnice, přípojnícové a vývodové odpojovače a odpojovače pomocných přípojníc.

- Typ B

Ve spodním podlaží jsou umístěny vývodové odpojovače kabelových vývodů, měřicí transformátory napětí a proudu. V horním podlaží se nachází hlavní a pomocné přípojnice, přípojnícové odpojovače, vypínače a ovládací skříně.

Jednopodlažní

S těmito rozvodnami se lze setkat v malých a středně velkých transformovnách a spínacích stanicích s jednodušší výbavou. Veškeré zařízení je umístěno v jednom podlaží a kobka tak není horizontálně dělená. To má za následek nižší provozní spolehlivost z toho důvodu, že pokud dojde k poruše, následky jsou větší.

Vícepodlažní

Jedná se o typ rozvodu, se kterými se lze setkat v důležitých uzlech, s velkými zkratovými proudy. Případná porucha má daleko menší následky než v případě dvou typů rozvodu uvedených výše. Užití tohoto typu rozvodu má za následek nižší přehlednost instalace, poměrně vysokou stavbu budovy a vysoké pořizovací náklady.

4.2.2 Kovově kryté rozváděče

Stejně tak jako venkovní rozvodny, jsou dnes překonány i rozvodny kobkové. Ty se sice při rekonstrukcích trakčních rozvodů někdy (pokud je to finančně výhodné) typově zachovávají a zmodernizují. Mnohem častějším řešením je užití kovově krytých rozváděčů, které se umísťují v budovách původních technologií či v pomocných budovách. Pokud se staví rozvodna nová, pak jsou náklady na stavební část nízké díky malým rozměrům zařízení.

Kovově kryté rozváděče lze rozdělit dle použitého izolačního média

- Kovově kryté vzduchem izolované rozváděče
- Kovově kryté rozváděče izolované fluoridem sírovým (SF₆)

4.2.2.1 Kovově krytý, vzduchem izolovaný rozváděč 25 kV, 50 Hz AC

Tyto rozváděče slouží k rozvodu jednoho napětového pólu trakční soustavy 25 kV 50 Hz AC ve vnitřních pevných trakčních zařízeních s možností bezobslužného provozu v normálních podmínkách. Prvky rozváděče mohou být ovládány a signalizovány místně, dálkově a ústředně.

Konstrukční provedení

Typové řady kovově krytých rozváděčů obsahují v základě 3 typy polí:

- Pole vývodové / přívodové

Toto pole se skládá ze dvou částí (pevná a výsuvná) tvořících celek. Pevnou částí je skříň

oceloplechové konstrukce s kvalitní povrchovou úpravou. Výsuvná část je tvořena vozíkem, na kterém je umístěn vypínač. Vysunutím vozíku dochází k rozpojení a oddálení kontaktů a k automatickému uzavření nepřístupné části průchozí sběrnice.

Propojení ovládacích a signalizačních obvodů, stejně jako propojení silových částí, mezi pevnou a výsuvnou částí je provedeno kvalitními a provozně spolehlivými konektory.

- Pole podélného dělení

Toto pole je stejné skříňové konstrukce jako pole výše uvedené. Liší se v tom, že neobsahuje výsuvný vozík a dělí se na dvě části:

- VN část – Zde se nachází odpojovače, uzemňovače, sběrnice (průběžná nebo průchozí), omezovač přepětí a kabelový vývod
- Část řídicích a ovládacích prvků – Tato část je obdobná jako u pole výše uvedeného

- Pole vlastní spotřeby

Toto pole je stejné skříňové konstrukce jako pole výše uvedené. Liší se v tom, že uspořádání je dvouprostorové nebo tříprostorové.

- Prostor transformátoru vlastní spotřeby
- Prostor ovládacích a řídicích přístrojů
- Prostor průchozí přípojnice

Hlavní výhody

Instalace ve vnitřních prostorech

Díky instalaci ve vnitřních prostorech není zařízení vystaveno venkovním nepříznivým vlivům venkovního prostředí. Tímto se výrazně prodlužují doby mezi jednotlivými údržbovými pracemi a šetří tak náklady. Náklady jsou také redukovány díky malým rozměrům rozvaděčů, a tak není stavební část tolik náročná. Dále je pak značně omezena možnost přístupu nepovolaných osob k zařízení, tím je výrazně omezeno riziko zranění těchto osob nebo poškození zařízení.

Bezpečnost obsluhy, provozní spolehlivost a snadná údržba

Rozvaděče umožňují bezpečnou a snadnou prohlídku, údržbu, uzemnění připojených kabelů a přípojníc v normálním provozu. Zařízení se skládá z materiálů určených s ohledem na odolnost proti ohni, vlhkosti (korozi) a nebezpečí šíření požáru z jednoho pole do dalších. Všechny důležité komponenty jsou pro snazší údržbu a případnou výměnu montovány na výsuvné části.

Modulárnost systému

Rozváděče mohou být konstruovány jako modulové nebo kompaktní (nerozšiřitelné). V případě modulárního systému to znamená, že se nabízí široká volnost ve výběru komponent pro zabudování, možného konstrukčního uspořádání a celkového řešení (typ řídicího systému, užití vypínačů různých výrobců, vysouvání vozíku ručně či motoricky atd.).

4.2.2.2 Kovově krytý rozváděč 25 kV, 50 Hz AC izolovaný plynem SF₆

Alternativou ke vzduchem izolovaným rozváděčům jsou rozváděče izolované fluoridem sírovým (SF₆).

Izolační médium SF₆

Plyn, fluorid sírový, je z chemického hlediska sloučeninou fluoru a síry. V přírodě se nevyskytuje, jedná se tedy o látku synteticky vyráběnou. Díky svým výborným dielektrickým vlastnostem se v posledních letech začal v širokém měřítku aplikovat ve vysokonapěťové spínací a rozvodné technice. Dále je nehořlavý, nekorozivní a netoxický. Vysoká elektrická pevnost plynu umožňuje stavbu velmi malých zařízení. V elektrotechnickém průmyslu se využívá fluoridu sírového elektrického stupně. To znamená, že se jedná o plyn pro aplikaci ve vysokonapěťové technice jako izolační plyn. Existují ještě stupeň elektronický (extrémně čistý plyn) a metalurgický.

Konstrukční provedení

Rozvodné zařízení je tvořeno jednotlivými skříňovými poli obdobně, jako je tomu u vzduchem izolovaných rozvaděčů. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že v těchto systémech se nenachází žádná výsuvná část a veškeré živé části jsou umístěny v atmosféře tvořené plynem fluoridem sírovým.

Rozvaděč se skládá ze čtyř základních níže jmenovaných částí

- Spínací skříň – Jedná se o hermeticky uzavřené pouzdro z nerezového ocelového plechu, ve kterém jsou umístěny veškeré živé části včetně přípojníc. Přívod a vývod elektrické energie je proveden skrze plynotěsné průchodky. Uvnitř pouzdra s fluoridem sírovým se nachází také oxid hlinitý, který podporuje regeneraci izolačního plynu. To je proces, kdy se teplem oblouku izolační rozkládaný izolační plyn po ochlazení dostává opět do původního stavu. Díky této vlastnosti není potřeba doplňovat množství plynu po celou dobu životnosti rozvaděče.

Pole jsou od sebe dělena oceloplechovou mezistěnou. To umožňuje provádění kontrol a prací, i když je vedlejší pole pod napětím. Odstranitelné kryty bývají blokovány s příslušným uzemňovačem, a proto je možné kryt odejmout pouze při sepnutém uzemňovači.

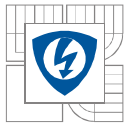
- Pohony – Ty bývají pružinové nebo střadačové a jsou obsaženy v polích s odpínači a vypínači.
- Pojistková nastavba – Nacházejí se vně hermetického pouzdra a s hlavním systémem je propojena skrze plynotěsné průchodky.
- Kabelový připojovací prostor – Je jím vybaveno každé pole.

Hlavní výhody

- Tato rozvodná zařízení spojují výše uvedené výhody kovově krytých vzduchem izolovaných rozvaděčů s výhodami, které vyplývají z užití dielektrického plynu jako izolantu.
- Bezpečnost obsluhy, provozní spolehlivost a snadná údržba
- Vyšší stupeň bezpečnosti je dán hermeticky uzavřeným zapouzdrněním živých částí. Nemůže zde dojít k nebezpečnému dotyku živých částí a díky kovovému materiálu pláště nehrozí osobám obsluhy vystavení vysokým intenzitám elektrického pole. Dále se zařízení stává nezávislým na vnějším prostředí a to včetně vlhkosti vzduchu a malých vodivých částic prachu. To znamená, že zařízení uvnitř pouzdra je bezúdržbové a poruchy způsobené obloukem jsou téměř vyloučeny. Obsluha bývá prováděna hřídelemi pohonů, které jsou vyvedeny do přední stěny. Hřídelem se manipuluje pomocí spínacích pák.

Nevýhody

- Tato rozvodná zařízení mají, na rozdíl od zařízení s kovově krytými vzduchem izolovanými rozvaděči, specifické nevýhody, dané užitím fluoridu sírového jako izolačního média.
- Fluorid sírový se řadí mezi takzvané skleníkové plyny. Jeho potenciál působení globálního oteplování je dokonce 22 200krát větší, než je tomu u oxidu uhličitého. Z toho důvodu byl zařazen mezi hlídané látky dle Kjótského protokolu. Dále se tento plyn dá sice označit za biologicky neškodný a v rozsahu pracovních teplot nijak neovlivňuje okolní materiály. Ovšem při vysokých teplotách nad 500 °C se začíná rozkládat a tím vzniklé chemické látky reagují s okolními materiály, čímž vzniklé zplodiny již mohou mít nepříznivé účinky na živé organismy. Z důvodu možnosti výskytu poruchy, při které by mohlo dojít k porušení těsnosti pouzdra a úniku nebezpečných zplodin do prostor přístupným obsluze je nutné zajistit účinné odvětrání místnosti. Protože je plyn SF₆ těžší než vzduch, odsávají se zplodiny zespodu.



-
- Z provozních a výše uvedených zdravotních hledisek musí zařízení splňovat požadavky na vzduchotěsnost systému. To znamená, že je třeba kontrola tlaku plynu uvnitř hermetického pouzdra. Kontrola je zajištěna užitím kontaktního manometru s ukazatelem tlaku vyvedeným na čelní stěnu rozvaděče. Zařízení může být vybaveno tlakovým spínačem pro dálkovou signalizaci.
 - Z výše uvedených důvodů se pořizovací náklady těchto rozvodných zařízení úměrně zvyšují. Ovšem technicko-ekonomické hledisko v mnoha případech převažuje nad vyšší cenou, zvláště pak v oblasti VVN.

5 Současná nabídka napájecích technologií na trhu

Na světovém i českém trhu působí řada firem nabízejících rozvaděče pro napájení drážní trakce. Ze spektra výrobků zde byly vybrány pět typových řad rozvaděčů od pěti různých výrobců, kteří se řadí mezi ty nejvýznamnější na českém trhu. Tři typy rozvaděčů jsou izolované vzduchem a dva plynem fluoridem sírovým.

5.1 Rozvaděče izolované vzduchem

OHL ŽS

Kovově kryté, vzduchem izolované rozvaděče řady SAxx jsou zařízení určená pro napájení drážní trakce. Instalují ve vnitřních pevných trakčních zařízeních se jmenovitým napětím 25 kV 50 Hz AC.

Technické parametry:

jmenovité napětí hlavních obvodů	25 kV
nejnižší trvalé napětí hlavních obvodů	19 kV
nejnižší krátkodobé napětí hlavních obvodů	17,5 kV
nejvyšší trvalé napětí hlavních obvodů	27,5 kV
nejvyšší krátkodobé napětí hlavních obvodů	29 kV
jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu	180 kV
jm. střídavé výdržné napětí průmyslové frekvence	80 kV
jmenovitý proud	1250 (2000) A
jm. krátkodobý výdržný proud / jm. doba zkratu	20 kA / 1 s, 12 kA / 3 s
jm. dynamický výdržný proud	30 kA
krytí krytu / přepážek	IP 40 / IP 20

Schneider Electric

Tento výrobce dodává na trh jednofázové rozvaděče pro napájení drážní trakce pod označením Delta H2000/1 – 27,5.

Technické parametry:

Jmenovité napětí	27,5 kV
jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu	200 kV
jm. střídavé výdržné napětí průmyslové frekvence	95 kV
Jmenovitý vypínací proud nakrátko	12 kA, 3 s
Jmenovitý zapínací proud, max	30 kA
Odolnost proti vnitřním obloukům	12 kA, 1 s
Jmenovitý proud	2000 A
Stupeň krytí	IP3X

ABB

UniGearR je řada jednofázových rozvaděčů pro aplikaci v drážní energetice z produkce firmy ABB.

Technické parametry:

Jmenovité napětí	27,5 kV
jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu	200 kV
jm. střídavé výdržné napětí průmyslové frekvence	95 kV
jm. krátkodobý výdržný proud	25 kA, 1 s
Odolnost proti vnitřním obloukům	25 kA, 1 s
jm. dynamický výdržný proud	63 kA
Jmenovitý proud	2000 A
krytí krytu / přepážek	IP 40 / IP 20

5.2 Rozvaděče izolované plynem SF6

Areva

Rozvaděče tohoto výrobce, které jsou určeny pro instalaci ve vnitřních prostorech pevných trakčních zařízení, nesou označení WI (WIA pro jednoduchý systém přípojníc, WIB pro dvojitý systém přípojníc).

Technické parametry:

Jmenovité napětí	27,5 kV
jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu	250 kV
jm. střídavé výdržné napětí průmyslové frekvence	95 kV
jm. krátkodobý výdržný proud	25 kA, 3 s
Odolnost proti vnitřním obloukům	25 kA, 1 s
jm. dynamický výdržný proud	63 kA
Jmenovitý proud	2000 A

Siemens

Výrobce tyto rozvaděče uvádí pod označením Sitras 8DA11 (jednopolový). Systém vychází z prověřeného třípólového systému 8DA10/8DB10, který je určen pro průmyslovou aplikaci.

Technické parametry:

Jmenovité napětí	25 kV
Nejvyšší dovolené trvalé napětí	27,5 kV
jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu	200 kV
jm. střídavé výdržné napětí průmyslové frekvence	95 kV
jm. krátkodobý výdržný proud	31,5 kA, 3 s
jm. dynamický výdržný proud	63 kA
Jmenovitý proud	2000 A



Všechny výše uvedené rozvaděče jsou vybaveny vakuovými vypínači. Každá rozvaděčová skříň dané řady má stejné vnější rozměry, ovšem hmotnosti bývají různé dle funkce pole. Hmotnosti se v průměru pohybují okolo pětiset kilogramů, přičemž nejtěžší bývají pole transformátorů vlastní spotřeby. Výrobci obvykle nedodávají na trh výrobek samotný, ale i včetně návrhu uspořádání, montáže, záruční a pozáruční servis včetně ekologické likvidace rozvaděčů.

6 Podrobný popis kovově krytého, vzduchem izolovaného rozváděče 25 kV, 50 Hz AC

6.1 Konstrukční část

Pro popis konstrukčních celků byl vybrán systém od firmy OHL ŽS typu SAxx, který slouží pro rozvod jednoho napěťového pólu trakční soustavy 25 kV 50 Hz AC ve vnitřních pevných trakčních zařízeních železničních drah s možností bezobslužného provozu v normálních podmínkách. Ovládání prvku umístěných v rozváděči a jejich signalizace může být prováděna místně, dálkově a ústředně.

Jedná se o řadu kompaktně řešených kovově krytých rozváděčů určených pro instalaci a provoz ve vnitřních pevných trakčních zařízeních se jmenovitým napětím 25 kV 50 Hz AC. Všechny tyto rozváděče jsou typově zkoušeny a vyráběny ve shodě se zněním normy ČSN EN 62 271-200 a normami souvisejícími. Všechny jednotlivé součásti zařízení instalované v rozváděči jsou navrženy, vyrobeny a jednotlivě zkoušeny podle odpovídajících částí normy ČSN EN 62 271-200 nebo, je-li to vhodné, podle jiných příslušných norem. Všechny VN části jsou stíněny kovovými uzemněnými kryty, části krytu hraničící s nepřístupnými oddíly jsou opatřeny zřetelným nápisem "NEDEMONTOVAT".

Rozváděče jsou navrženy s ohledem na to, aby se prohlídka a údržba a uzemnění připojených kabelu a přípojníc v normálním provozu, mohly provádět snadno a bezpečně, přičemž blokové podmínky definované normou ČSN EN 62 271-200 jsou dodrženy.

Materiály použité v rozváděčích jsou určeny pro provoz v daných podmínkách s ohledem především na odolnost proti vlhkosti a ohni tak, aby nebezpečí šíření požáru z jednoho pole nebo oddílu do dalších bylo minimální, stejně jako případná koroze, způsobená atmosférickými a elektrolytickými vlivy.

V rámci bezpečnosti osob při vzniku vnitřního oblouku jsou rozváděče s ohledem na způsob jejich provozu standardně vyráběny tak, aby plnily kritéria kategorie LSC2-PI s ohledem na následující.

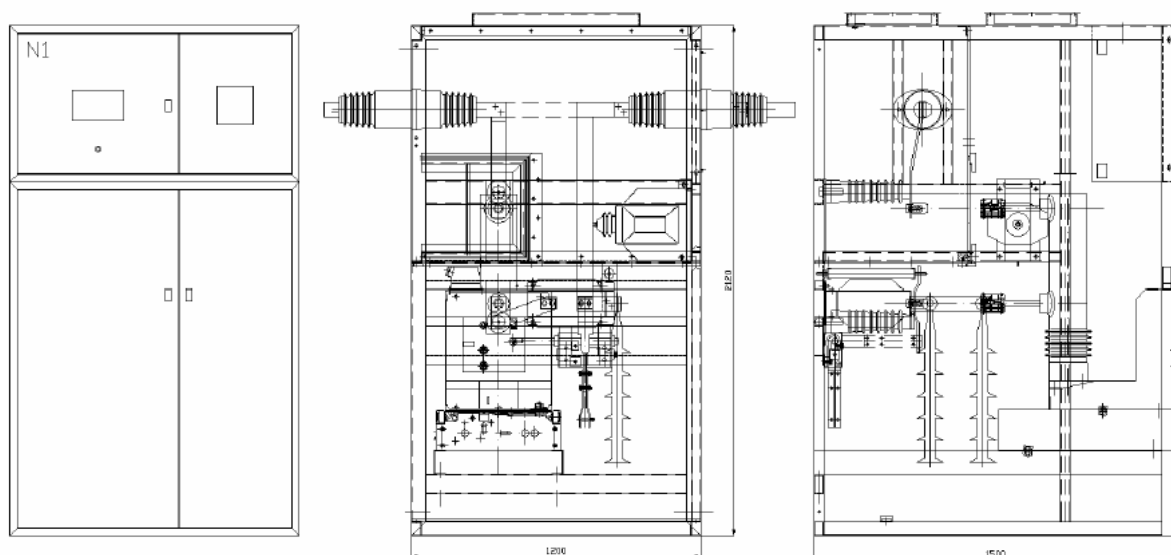
- ztrátu nepřerušenosti provozu (při otevření přístupných oddílů mohou být ostatní jednotky pod napětím)
- provedení zákrytu mezi živými částmi a otevřeným přístupným oddílem (mezi tyto oddíly jsou vloženy izolační přepážky)

Pro zvýšení stupně ochrany obsluhy v případě vnitřního obloukového zkratu bývají rozváděče vybaveny následujícími prvky.

- světlocitlivé indikátory

- vhodné pojistky a spínací přístroje pro omezení velikosti procházejícího proudu a omezení doby zkratu
- dálkové ovládání
- zařízení pro uvolnění přetlaku, případně doplněné o odtah toxických zplodin mimo budovu
- přemístění vozíku z nebo do pracovní polohy lze provést pouze při zavřených dveřích

6.1.1 Pole vývodu / přívodu – SANx



Obr. 11 Konstrukční uspořádání rozváděčového pole vývodu / přívodu SANx

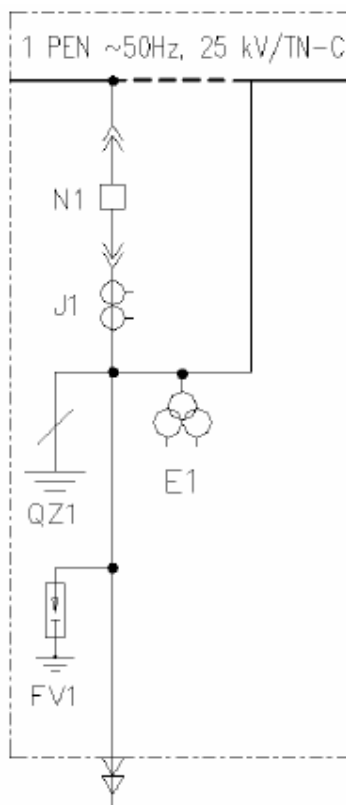
Kovově zapouzďené rozváděče typu SANx se skládají z pevné a výsuvné části (vozíku), které spolu tvoří jeden kompaktní celek.

Na výsuvné části je umístěn vakuový vypínač. Zasouvání a vysouvání vypínače může být manuální nebo motorické. Po vysunutí vozíku dochází k rozpojení a oddálení obou kontaktů a dále pak k automatickému uzavření otvoru pro připojení horního kontaktu vypínače na sběrnici (a tedy uzavření nepřístupného oddílu průchozí sběrnice). Umístění technologie náročné na údržbu na výsuvném vozíku značně zjednodušuje provádění údržbových prací, nastavování a měření. Propojení ovládacích a signalizačních obvodů pevné a výsuvné části je zajištěno pomocí kvalitních konektorů, stejně jako připojení silových.

Pevná část (skříň) je oceloplechové konstrukce s kvalitní povrchovou úpravou práškovou barvou. Vnitřní prostor skříně je konstrukčně rozdělen do tří funkčních oddílů.

- oddíl přípojnice – jedná se o oddíl přístupný pomocí nástroje, který se nachází v zadní horní části rozváděče, kde je umístěna přípojnice s kontaktním roubíkem
- blokový přístupný oddíl VN přístrojů – ve kterém se nachází vakuový vypínač, uzemňovač, přístrojové transformátory proudu a napětí, omezovač přepětí atp.
- přístupný oddíl řídicích a ovládacích přístrojů – tzv. přístrojová nika, umístěná v prostoru nad vozíkem a za provozu volně přístupná z čelní strany skříně, obsahující veškeré prvky NN, a to ochrany, relé, svorky, spínače a řídicí automaty. Ve dveřích přístrojové niky je zabudován ovládací panel, případně modul ochrany. Všechny tyto přístroje jsou přístupné kdykoli, bez narušení vlastního provozu napájecí stanice.

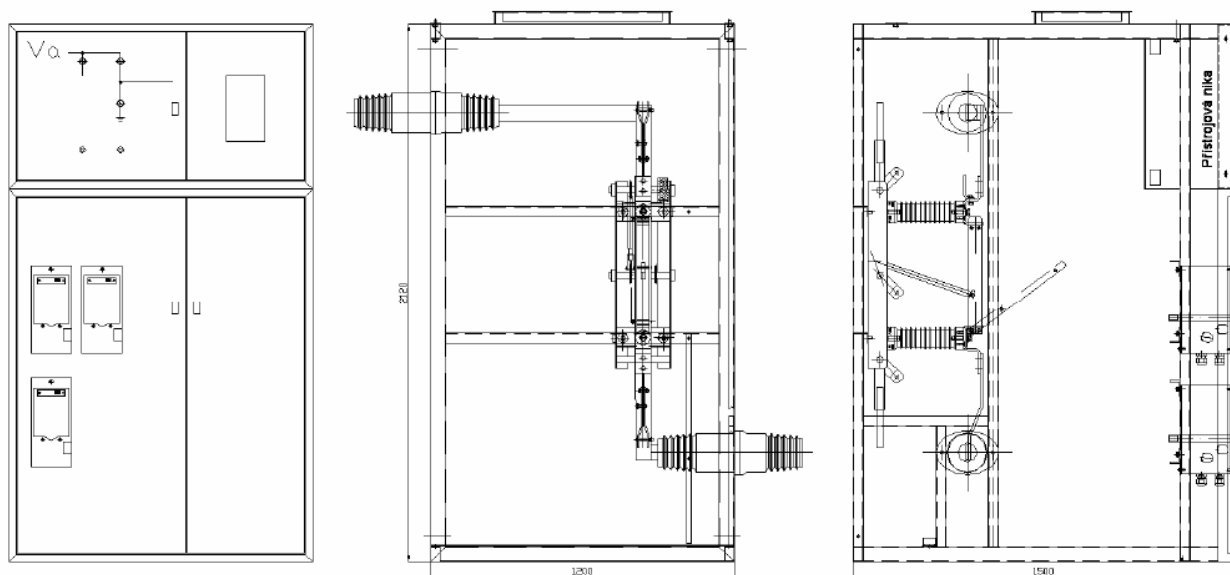
Oddíl přípojnic a oddíl VN přístrojů jsou od sebe vzájemně odděleny systémem zásuvných izolačních přepážek.



Obr. 12

Silové schéma zapojení rozváděčového pole SANx

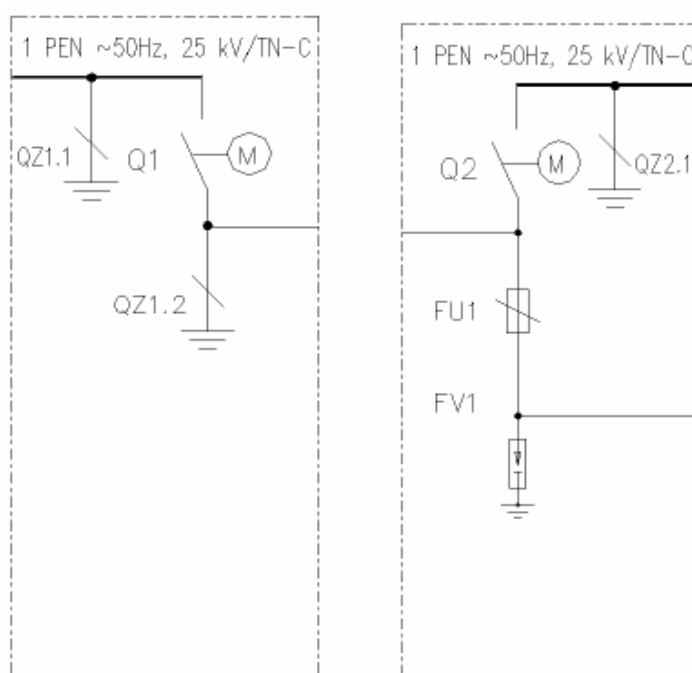
6.1.2 Pole podélného dělení – SASx



Obr. 13 Konstrukční uspořádání rozváděčového pole podélného dělení SASx

Kovově zapouzdražené rozváděče typu SASx jsou stejné konstrukce jako rozváděče typu SANx, ale bez výsuvné části a pouze jako dvouprostorové – tzn. s odděleným prostorem VN přístrojů a přípojnice a oddílem řídicích a ovládacích přístrojů.

V oddílu VN přístrojů se nachází odpojovače, uzemňovače, průběžná nebo průchozí sběrnice, příp. pojistka, omezovač přepětí a kabelový vývod. Osazení přístrojové niky je obdobné jako u skříní typu SANx.



Obr. 14 Silové schéma zapojení rozváděčového pole SASx

6.1.3 Pole transformátoru vlastní spotřeby – SATx

Kovově zapouzdřené rozváděče typu SATx jsou stejné konstrukce jako rozváděče typu SASx, konstrukčně jsou ale řešeny jako dvouprostorové až tříprostorové – tzn. s odděleným prostorem transformátoru vlastní spotřeby a oddílem řídicích a ovládacích přístrojů, příp. s oddílem průchozí přípojnice.

6.1.4 Pole přímé kompenzace – SACx

Kovově zapouzdřené rozváděče typu SACx jsou stejné konstrukce jako rozváděče typu SATx, ve vnitřním prostoru skříně je však místo TVS umístěn měnič VN kompenzace (COMPACT) ve výsuvném provedení. Vstupní dveře do VN prostoru rozváděče jsou jednokřídlé a jsou vybaveny větracími průduchy. V horní části skříně je instalován ventilátor zajišťující dostatečný průtok chladicího vzduchu přes měnič.

6.2 Standardní přístrojové vybavení

Vypínač

Jedná se o přístroj určený pro spínací funkci v celém rozsahu proudů, a to až do hodnoty zkratového proudu. Především kvůli malým rozměrům, vhodných pro rozváděče umístěné ve vnitřních prostorách pevných trakčních zařízení, spolehlivé funkci a bezúdržbovému provozu se používají vakuové vypínače. Oproti jiným typům vypínačů mají malé obloukové napětí a tím i malý zkratový výkon. Díky malým zdvihům kontaktů nejsou kladeny na pohony vypínačů žádné zvláštní nároky. Zhášecí komora je hermeticky oddělena od okolí, proto může pracovat v jakémkoli prostředí. V rozváděčích řady SAxx jsou montovány dva typy vypínačů.

výrobce :	SERW	Siemens
typ :	5 CVD – 02712	3AH4784 – 3RE44
U_{jm} :	27,5 kV	27,5 kV
I_{jm} :	1250 A	1600 A
jmenovitý vypínací proud :	25 kA	25 kA

Odpojovač

Jedná se o typ přístroje bez oblouku. Jeho funkce je především ochranná. Konstrukci má přístroj velice jednoduchou. V zapnutém stavu musí snést tepelné a dynamické účinky zkratového proudu a být schopno dalšího provozu. V rozváděčích řady SAxx jsou montovány odpojovače firmy SERW.

výrobce :	SERW
typ :	5SNJ(U1)-038 (U1 – se zkratovačem)
U_{jm} :	38,5 kV
I_{jm} :	1250 A (630, 400 A)
jm. krátkodobý proud :	25 kA
dynamický proud :	63 kA

Měřicí transformátor proudu

Rozvážeče jsou vybaveny měřicími transformátory proudu firmy KPB Intra typu CTS 38. Transformátory CTS mají jednozávitové nebo vícezávitové primární vinutí. Moderní konstrukce těchto transformátorů umožňuje přepínání jak na straně sekundární, tak i na straně primární. Sekundární vinutí je navinuto na magnetickém jádře z orientovaných plechů případně ze slitiny niklu, železa a mědi. Všechny aktivní části transformátoru jsou zality epoxidovou směsí. Hodnota sekundárního proudu je 5 A nebo 1 A s možností kombinace. Třídy přesnosti pro obvody měření jsou 0,2, 0,5, 0,2S, 0,5S, 1, 3, pro obvody jištění jsou 5P, 10P. Transformátory splňují požadovanou třídu přesnosti v rozmezí 25 % až 100 % jmenovité zátěže. Krajiní provozovací proud je 120 % I_N

Izolační napětí	40.5 kV
Zkušební napětí	95 kV
Zkušební napětí rázové	185 kV
Jmenovitý prim. proud	5-1250 A
Jmenovitý sek. proud	5 (1) A
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Výkon	5-60 VA
Třída přesnosti	0,2, 0,5, 0,2S, 0,5S, 1, 3, 5P, 10P
Hmotnost	40 kg

Měřicí transformátor napětí

Rozvážeče jsou vybaveny měřicími transformátory napětí firmy KPB Intra typu VTS 38, které jsou provedeny jako jednofázové jednopólově izolované transformátory určené pro použití v sítích vysokého napětí. Jsou určeny k měření a jištění rozvodných zařízení VN vnitřního provedení. Pro ochranu okolního rozvodného systému může být přístroj vybaven VN pojistkou. Transformátory splňují požadovanou třídu přesnosti v rozmezí 25 % až 100 % jmenovité zátěže. Magnetický obvod napěťových transformátorů je vyroben z orientovaných transformátorových pásků ve tvaru „C“ jádra. Všechny aktivní části transformátoru jsou zality epoxidovou směsí.

Hodnoty sekundárních napětí jsou $100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$, $120/\sqrt{3}$, pomocných sekundárních napětí pak $100/3$, $110/3$, $120/3$ V.

Izolační napětí	40.5 kV
Zkušební napětí	95 kV
Zkušební napětí rázové	200 kV
Jmenovité prim. napětí	$3000/\sqrt{3} - 35000/\sqrt{3}$ V
Jmenovité sek. napětí	$100/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$, $120/\sqrt{3}$ V
Jmenovité pom. napětí	$100/3$, $110/3$, $120/3$ V
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Výkon	10, 30, 50, 75, 100, 150 VA
Třída přesnosti	0.2, 0.5, 1, 3P, 6P
Krajní výkon	500 VA
Hmotnost	33 kg
Schválení	TCM 212/98-2963

6.3 Variantní provedení

Kompaktní rozváděče typu SAxx jsou řešeny jako modulové, čímž se nabízí široká volnost ve výběru jednotlivých užitých součástí a možného konstrukčního uspořádání a celkového řešení, jako je například využití distribuovaného nebo centrálního řídicího systému, nasazení vypínačů různých výrobců s motorickým nebo manuálním vysouváním, uspořádání s průběžnou (TNS) nebo průchozí (SpS) sběrnici atd.

7 Základní normativní požadavky

Na trakční rozvodná zařízení se vztahuje celá řada technických norem, právních předpisů a vyhlášek. Konkrétně technických norem, předpisů a technických ustanovení týkajících se kovově krytých rozvaděčů pro napájení drážní trakce 25 kV AC je celkem 60. Proto bude v následujícím textu zmíněno jen několik důležitých norem.

7.1 ČSN 33 3505

Předpisy pro elektrické trakční napájecí a spínací stanice

Tato norma stanovuje zásady pro projektování, výstavbu, zkoušky, provoz a údržbu trakčních napájecích a spínacích stanic. Dále definuje jednotlivé typy trakčních napájecích stanic z několika hledisek (dle uspořádání, jejich použití, způsobu obsluhy a řízení) a jejich jednotlivé části. Zahrnuje ustanovení jak pro střídavou tak i pro stejnosměrnou trakční napájecí soustavu, nicméně tato práce se zabývá pouze střídavou soustavou, proto zde budou stručně popsány pouze některé její části.

Rozmístění napájecích a spínacích stanic

Rozmístění stanic se řídí energetickými výpočty a ročním dopravním tokem. Dále je stanovena nutnost cyklického připojování napájecích stanic k nadřazené trojfázové síti tak, aby bylo dodrženo hledisko napěťové nesymetrie. Spínací stanice je nutno umísťovat tak, aby zvýšily výkonnost a propustnost tratí a snížily ztráty výkonu a úbytky napětí.

Stavební provedení

Budovy trakčních zařízení musí být řešeny účelně, aby vyhovovaly podmínkám provozu, bezpečnosti obsluhy a ochrany zařízení. Stanice mohou být provedeny venkovního nebo krytého (skříňové provedení). Provozních místností bez obsluhy musí být temperovány alespoň na teplotu 5 °C a to z důvodů správné funkce přístrojů, vyloučení orosení a zamrznutí některých zařízení. Dále je třeba zajistit odpovídající osvětlení tak, aby šlo centrálně vypínat, umožňovalo individuální osvětlení a zajišťovalo nouzové osvětlení při ztrátě napětí. Je řešena i potřeba dopravy těžkých objemných zařízení, to znamená zhodnocení stávající dopravní obslužnosti a případnému vybudování nových komunikací. Jelikož prostory napájecích a spínacích trakčních stanic nesmí být přístupny nepovolaným osobám, norma nařizuje jejich znepřístupnění oplocením kolem pozemku.

Trakční transformovny

V této části se řeší nesymetrické zatížení nadřazené sítě a jeho předcházení v podobě použití říditelných jednofázových transformátorů zapojených do „V“. Trakční transformátor je třeba chránit jak přímo proudovými a napěťovými ochranami, tak nepřímo proti nadměrnému oteplení. Stanice musí být dále vybavena příslušnými měřicími přístroji.

Spínací stanice

Tyto typy stanic obsahují soubor zařízení pro výkonové spínání úseků trakčního vedení odpovídajícího napětí. Stanice jsou zařizovány pro zvýšení spolehlivosti napájení elektrizovaných tratí, zvýšení výkonnosti pevných elektrických trakčních zařízení, zvýšení propustnosti tratí, snížení energetických ztrát a úbytků napětí.

Norma se dále zabývá kompenzací účinníku, napájením zabezpečovacích zařízení o napěťové hladině 6 kV a dalších vedlejších systémů, technickou diagnostikou, zkoušením a revizemi elektrických trakčních zařízení.

7.2 ČSN EN 62271-200

Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 200: Kovově kryté rozváděče na střídavý proud pro jmenovitá napětí nad 1 kV do 52 kV včetně

Tato norma stanovuje požadavky na továrně vyrobené kovově kryté rozváděče na střídavý proud pro jmenovité napětí 1 kV až 52 kV vnitřního a venkovního provedení s frekvencí do 60 Hz včetně. Kryty mohou obsahovat pevné nebo odnímatelné části a mohou být izolovány médiem. Norma se vztahuje jak na jednofázové, tak i třífázové rozváděče a mimo jiné definuje jmenovité provozní hodnoty proudů a napětí včetně hodnot při přechodných dějích, které musí být rozváděč schopen snést. Dále upravuje podmínky provozu rozváděče s izolačním médiem (SF₆).

Konstrukce a provedení

Rozváděče musí být navrženy tak, aby byla umožněna normální obsluha, prohlídky, údržba a kontrola, zda je hlavní obvod pod napětím, vybíjení elektrostatických nábojů, lokalizace poruch a další provozní úkony. Všechny odnímatelné části stejného typu musí být navzájem zaměnitelné, přičemž části stejné nebo vyšší proudové a izolační hladiny mohou být instalovány v místech nižší proudové a izolační hladiny.

Uzemnění

Hlavní obvod

Všechny části hlavního obvodu, které se podrobují údržbě, musí být uzemněny před zpřístupněním (neplatí pro odnímatelné části).

Kryty

Části krytu musí být propojeny (při montáži) uzemňovacím vodičem. Vzájemné propojení musí být schopno přenášet zkratový výdržný proud uzemňovacího obvodu dle následující tabulky. Minimální průřez uzemňovacího obvodu je 30 mm².

Maximální proudová hustota pro Cu [A/mm ²]	Doba přenášení zkratového proudu [s]
200	1
125	3

Odnímatelné části

Musí zůstat uzemněny i ve zkušební a odpojené poloze a mezipolohách

Blokovací zařízení

Z bezpečnostních důvodů a požadavků na snadnost obsluhy jsou některé součásti blokovány.

Rozváděč s odnímatelnými částmi

Vysunutí či zasunutí vypínače, odpínače, spínače je možné jen ve vypnutém stavu. Jejich funkce je možná pouze v pracovní, odpojené, zkušební nebo uzemněné poloze. Jejich zapnutí je možné jen, když jsou připojeny k řídicím a pomocným obvodům pro automatické vypnutí.

Rozváděč vybavený odpojovači

Blokování slouží k zabránění jejich nesprávné činnosti. Funkce odpojovače je možná pouze, když je příslušný vypínač, spínač nebo stykač vypnutý. Jejich funkce je možná jen, když je příslušný odpojovač zapnutý, vypnutý nebo uzemněn.

Vnitřní zkrat

Rozváděč je v zásadě konstruován tak, aby zabránil vzniku vnitřních zkratů. Provozovatel zařízení musí dle charakteristiky sítě a pracovních podmínek zvolit správný typ rozváděče. Pokud je rozváděč nainstalován, provozován a udržován dle pokynů výrobce, je možnost vzniku vnitřního obloukového zkratu malá, ne však zcela vyloučena. Může nastat vlivem poruchy, výjimečných provozních podmínek nebo chybou obsluhy, přičemž vzniká nebezpečí pro obsluhu.

Opatření pro ochranu obsluhy v případě vzniku vnitřního obloukového zkratu:

- snímače tepla a světla v kombinaci s vnější indikací
- vhodné pojistky
- automatizace provozu a dálkové ovládání
- zařízení pro uvolnění přetlaku

Kryty

Kryty mají být kovového provedení. Vnější části mohou být z izolačního materiálu za předpokladu, že vysokonapěťové části jsou úplně stíněny kovovými uzemněnými přepážkami nebo zákryty. Krytí je minimálně úrovně IP 2X. Kovové kryty musí být schopny přenášet stejnosměrný proud 30 A při maximálním úbytku 3 V vzhledem k uzemňovacímu bodu. Dosedací plocha k usazení rozváděče může být považována za součást krytu, naopak zdi nemohou. Horní kryty nejsou nosné, pokud tedy výrobce výslovně neuvádí v technickém průkazu výrobku, že nosné jsou.

Zkoušky

Norma definuje jakým zkouškám je nutné zařízení podrobit, ať už se jedná o zkoušky typové nebo kusové.

Typové: - zkoušky izolační hladiny

- zkoušky na oteplení
- zkoušky na odolnost hlavních a uzemňovacích obvodů proti jmenovitému dynamickému a jmenovitému krátkodobému výdržnému proudu
- zkoušky zapínací a vypínací schopnosti zabudovaných spínacích přístrojů
- zkoušky ochrany osob před dotykem nebezpečných částí a před vnikem těles
- ověření ochrany osob před nebezpečnými účinky elektrického proudu
- ověření účinků elektrického oblouku při vnitřním zkratu
- zkoušky elektromagnetické kompatibility

- Kusové:
- zkoušky mechanických funkcí
 - zkoušky pomocných elektrických, pneumatických či hydraulických zařízení
 - zkoušky předávací na místě po montáži (napětím hlavních obvodů)

Pokyny pro volbu rozváděčů pro provoz

Norma uvádí, že rozváděče mohou mít různá konstrukční řešení v závislosti na změnách technologie či provozních funkčních požadavků. Volba má zahrnovat posouzení funkčních požadavků, volbu vnitřních přepážek, volbu jmenovitých hodnot dle provozních podmínek a volbu provedení (vypínač pevný nebo výsuvný, izolace vzduchem nebo plynem). Je třeba také zohlednit intervaly údržby daných typů rozváděčů (nepřerušitelnost provozu).

7.3 DALŠÍ NORMY

ČSN EN 50 163 ed. 2

Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav

Tato norma stanovuje základní charakteristiky napájecích napětí trakčních soustav, a základní charakteristiky napájecích napětí drážních vozidel. Zabývá se kolísáním napětí, frekvence, zkreslením napětí apod.

ČSN EN 60694

ČSN EN 60694 Tato mezinárodní norma platí pro spínací a řídicí zařízení na střídavý proud vnitřního a venkovního provedení pro použití v soustavách s kmitočtem do 60 Hz včetně a napětím nad 1 000 V. Tato norma platí pro všechna spínací a řídicí zařízení pro napětí nad 1 000 V, kromě zvláštních typů spínacích a řídicích zařízení, pro které platí příslušné normy IEC.

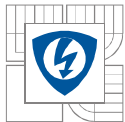
ČSN 34 1500

Elektrotechnické předpisy. Předpisy pro elektrická trakční zařízení

Tato norma stanoví základní a společné zásady pro projektování, stavbu, zkoušení, provoz, údržbu a rekonstrukci elektrických pevných trakčních zařízení.

Tato norma platí pro:

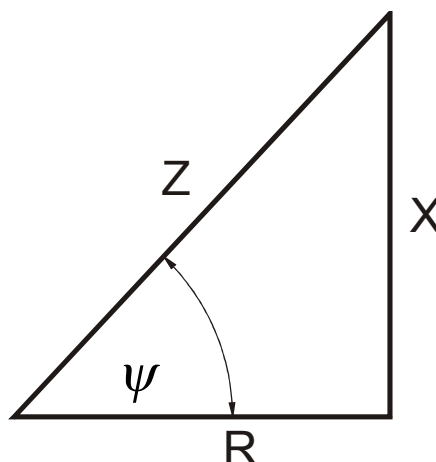
- a) elektrická trakční zařízení elektrických drah elektrizovaných stejnosměrnou nebo jednofázovou trakční proudovou soustavou, u nichž jsou hnací vozidla napájena z trakčního vedení
- b) elektrická trakční zařízení opraven, prohlídkových stanovišť, zařízení pro elektrické předtápění vlakových souprav apod. napájena z trakčního vedení



- c)* elektrická silová zařízení, která nejsou určena pro trakční účely, ale jsou napájena z pevných trakčních zařízení v rozsahu touto normou předepsaném
- d)* vodivé části v prostoru ohrožení trakčním vedením a v místech touto normou předepsaných
- e)* elektrická silová, zabezpečovací, sdělovací a jiná přenosová vedení a zařízení, která jsou vedena nebo umístěna na nosných konstrukcích trakčního vedení nebo v prostoru ohrožení trakčním vedením

8 Elektrické parametry jednofázového trakčního vedení 25 kV AC

Jelikož se jedná o rozvod střídavého proudu, je třeba ve výpočtech používat impedanci Z , kterou tvoří činná a reaktanční složka odporu, jak je znázorněno na obrázku 15 a popsáno níže.



Obr. 15 Impedanční trojúhelník

$$\bar{Z} = Ze^{j\psi} = R + jX = Z \cos \psi + jZ \sin \psi \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$Z - \text{impedance} \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$R - \text{činný odpor} \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$X - \text{reaktance} \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

Dále platí:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{X}{R}$$

Musíme počítat s účínkem lokomotiv, který se v méně příznivých případech (provoz lokomotivy s křemíkovými usměrňovači) bez kompenzace pohybuje v rozmezí přibližně od 0,75 do 0,83 oproti moderním lokomotivám s asynchronními motory v kombinaci s kompenzací účínku, u kterých se účínek může dostat až nad hodnotu 0,95.

Stejně tak jako impedanční odpor, i celkový úbytek napětí je dán dvěma složkami:

$$\Delta U_R = R \cdot I \quad \text{úbytek na činném odporu}$$

$$\Delta U_X = X \cdot I \quad \text{úbytek na reaktančním odporu}$$

Ztráty výkonu na vedení se tvoří pouze v činném odporu, proto se počítají podle vztahu:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = R \cdot I^2$$

8.1 Parametry trakční sestavy

Tabulka impedancí výběru trakčních sestav, přičemž hodnoty byly stanoveny jako průměrná hodnota měření Českých Drah.

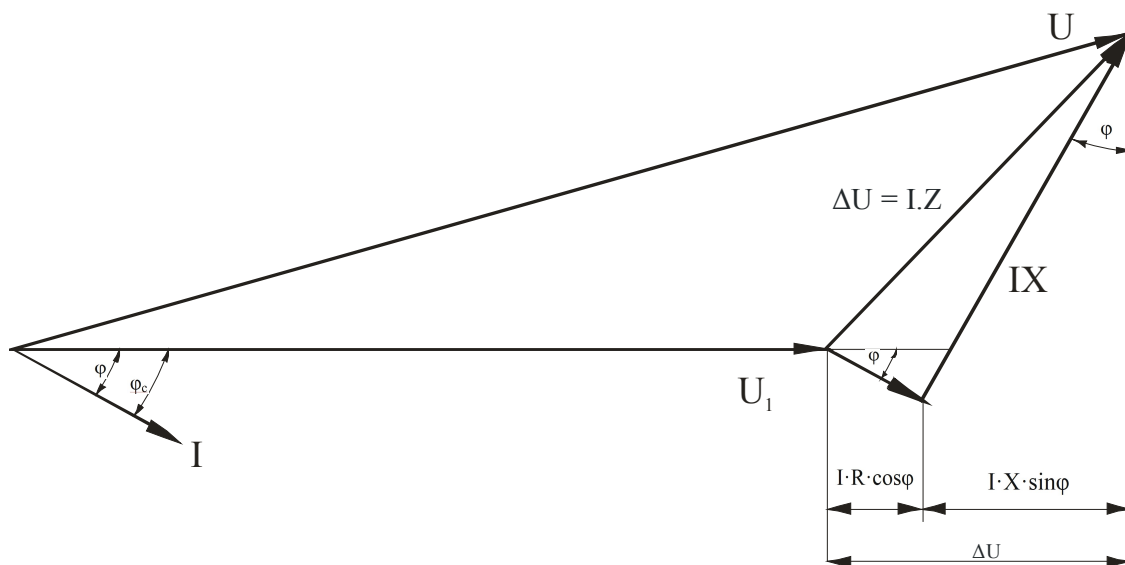
Použitá sestava trolejového vedení	Měrná impedance soustavy [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]				
	Z_A	Z_B	Z_C	Z_D	Z_E
50 mm ² Bz + 100 mm ² Cu	0,26 + j0,45	0,25 + j0,40	0,28 + j0,52	0,21 + j0,28	0,14 + j0,26
70 mm ² Fe + 100 mm ² Cu	0,34 + j0,61	0,33 + j0,55	0,36 + j0,66	0,29 + j0,43	0,18 + j0,33
50 mm ² Bz + 100 mm ² Cu + 95 mm ² AlFe6	0,18 + j0,36	-	-	-	-
70 mm ² Bz + 100 mm ² Cu + 95 mm ² AlFe6	0,21 + j0,41	0,20 + j0,36	0,24 + j0,45	0,16 + j0,27	0,12 + j0,23
35 mm ² Bz + 80 mm ² Cu	0,31 + j0,47	-	-	-	-

Pro hlavní sestavy do rychlosti 200 km/h (v České republice do 160 km/h) se používá především lano 100 Cu + 50 Bz. Pro vedlejší soustavy do rychlosti 120 km/h (vedlejší koleje stanic a tratě s nižšími rychlostmi) se používá 80 Cu + 50 Bz.

8.2 Kontrola vedení na úbytek napětí

Napětí na vstupu do trakčních transformoven je považováno za konstantní, přičemž u transformátorů počítáme s napětím nakrátko dle hodnot v tabulce níže:

napětí nakrátko u_k [%]	12,5	10	10	8
Výkon transformátoru P [MVA]	13,3	10	8	6,5



Obr. 16 Fázorový diagram proudu, napětí a úbytku při zatížení jedním vlakem

Úbytek napětí ΔU na vedení je fázově posunutý vůči napětí U přivedenému. Absolutní hodnota úbytku, měřená na sběrači lokomotivy, je dána dle výše uvedeného vektorového diagramu při fázovém úhlu φ mezi vektory proudu a napětí.

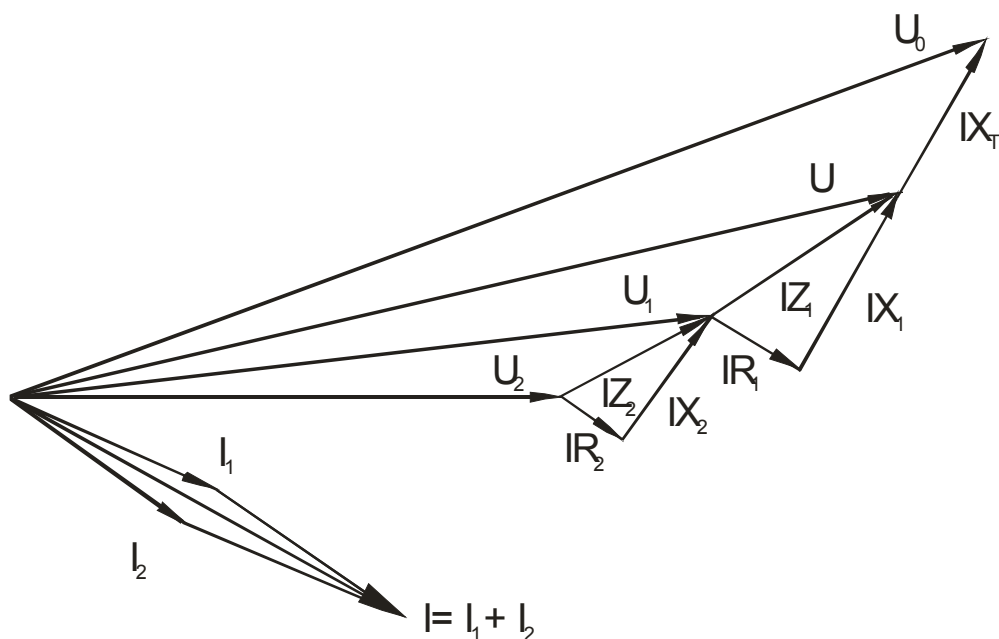
$$\Delta U = I \cdot [R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi]$$

Podle výše uvedené rovnice lze vypočítat úbytek pro jeden odběr. R a X jsou celkové hodnoty odporu respektive reaktance pro vzdálenost odběru (vzdálenost lokomotivy) L [km^{-1}] od trakční napájecí stanice.

$$R = R_0 \cdot L; \quad X = X_0 \cdot L; \quad Z = Z_0 \cdot L$$

R_0 , X_0 , Z_0 jsou parametry na jeden kilometr vedení

V provozu trakčních vedení se ovšem nevyskytuje pouze jeden odběr na celém úseku. Pokud je tedy v úseku vedení více odběrů, vektory proudů a úbytků napětí se sčítají, jak je naznačeno na obrázku 16, na němž je znázorněn nejjednodušší případ vedení zatíženého dvěma odběry a napájeného z jedné strany. V případě více odběrů je postup určení úbytků na vedení totožný.



Obr. 16 Fázorový diagram proudu, napětí a úbytku při zatížení dvěma vlaky

Pro určení napětí transformátoru naprázdno U_0 je třeba znát jeho impedanci. Jelikož je u transformátoru $\psi_t = 90^\circ$, je možné zanedbat činnou složku odporu transformátoru R_t a počítat pouze s jeho reaktancí

$$Z_t \doteq X_T = \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{u_{k\%}}{100} = \frac{U_n^2}{P_n} \cdot \frac{u_{k\%}}{100} \quad [\Omega]$$

Postupuje se tak, že se s konstrukcí začne u vlaku, který se nachází od napájecí stanice nejdále. Pro něj si zvolíme napětí v místě odběru U_2 a určíme úbytek pro proud I_2 a délku vedení L_2 . Pokud k napětí U_2 přičteme náš úbytek $Z_2 \cdot I_2$, získáme napětí U_1 v místě odběru proudu vlaku, který se nachází blíže napájecí stanici. V úseku vedení L_1 mezi bližším vlakem a napájecí stanicí teče proud, který je složen z odběrových proudů obou vlaků $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$, pro který sestrojíme úbytkový trojúhelník a součtem napětí U_1 a příslušného úbytku napětí $Z_1 \cdot I_1$ dostaneme napětí na sekundárních svorkách trakčního transformátoru U v napájecí stanici. V tomto okamžiku je potřeba k tomuto napětí přičíst úbytek napětí na transformátoru při chodu naprázdno U_0 . Pokud je takto určené napětí rovno nebo nižší než 27 kV dle ČSN 34 1500, jsou poměry v normě. U jednofázových drah o frekvenci 50 Hz s jednostranným napájením je výpočet pro větší počet odběrů je poměrně složitý a proto je vhodné použití síťových modelů.

V případě provozu dvoukolejných tratí se příčným propojováním trolejového vedení značně sníží impedance vedení a tím i úbytky na něm. K přibližným výpočtům lze postup

zjednodušit a to tak, že nebereme v potaz malý úhel mezi fázory dílčích napětí spotřebičů δ a úhly φ_1 a φ_2 a další se vztahují k vektoru U_2 . Pak platí následující.

$$\Delta U = \sum_{k=y}^n I_k \cdot R_k \cdot \cos \varphi_k + \sum_{k=y}^n I_k \cdot X_k \cdot \sin \varphi_k \leq \Delta U_{\max}$$

I_k – proud odebraný k-tým vlakem

R_k – činný odpor délky vedení od vlaku k napájecí stanici

X_k - reaktance délky vedení od vlaku k napájecí stanici

φ_k – účinník k-tého vozidla

Za předpokladu, že úhel φ_k všech odběrů je roven a impedance vedení konstantní, můžeme výpočet dále zjednodušit.

$$\Delta U = [R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi] \cdot \sum_{k=1}^n I_k \cdot L_k \leq \Delta U_{\max}$$

I_k – proudy odebírané vlaky

L_k – vzdálenost vlaků od napájecí stanice

V takovém případě lze počítat úbytky stejně jako ve stejnosměrných rozvodech s tím rozdílem, že činný odpor jednoho kilometru vedení R je nahrazen impedancí.

$$Z_0 = R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

Tím dostaneme následující vztah.

$$\Delta U = Z_0 \sum_{k=1}^n I_k \cdot L_k$$

Fázový úhel φ_0 mezi vektorem napětí U_n a U_0 v napájecí stanici určíme dle následujícího vztahu.

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\sum_{k=1}^n X_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k - \sum_{k=1}^n R_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k}{U_0}$$

Pokud je $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_k$ a hodnoty X_0 a R_0 jsou konstantní, pak platí následující.

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{[X_0 \cdot \cos \varphi - R_0 \cdot \sin \varphi] \cdot \sum_{k=1}^n I_k \cdot L_k}{U_0}$$

Fázový úhel vektoru proudu proti napětí U_0 je v napájecí stanici $\varphi_c = \varphi_0 + \varphi$

8.3 Kontrola oteplení

Na rozdíl od stejnosměrných vedení, kde je rozhodujícím faktorem oteplení úbytek napětí, průřezy jednofázových trakčních vedení jsou poměrně malé a proto je potřeba prověřit proudové zatížení, aby nedošlo k nadměrné proudové hustotě ve vedení a tím i k nedovolenému oteplení. Ve většině případů postačí kontrola v místě s nejméně příznivými podmínkami, tedy v blízkosti napájecí stanice. Dovolené proudové zatížení různých typů vodičů je uvedeno v tabulce níže.

Tabulka dovolených proudových zatížení trakčních vodičů	
Vodič	Dovolené proudové zatížení
100 Cu + 70 Fe	639 A
80 Cu + 50 Fe	535 A
100 Cu + 70 AlFe 6	943 A
100 Cu + 95 AlFe 6	848 A
100 Cu + 50 Bz	780 A
100 Cu + 70 Fe + 120 Al	1027 A

Dovolená proudová hustota a tím i dovolená maximální teplota vedení je dána v různých zemích dána odlišně. V České Republice se počítá s proudovou hustotou $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

8.4 Zkratové proudy

Z hlediska volby a nastavení nadproudových ochran je bezpodmínečně nutné znát velikost zkratového proudu. Pokud nekombinujeme nadproudovou ochranu spolu s fázovým členem, kdy se ochrany uvádí v činnost impulzem závislým na amplitudě proudu a jeho fázovým posunutím, musí být proud zkratu v nejvzdálenějším bodě větší, než je maximální provozní proud z napájecí stanice.

Jelikož je reaktance trakčního transformátoru je poměrně velká, zkratový proud počítáme nejprve za předpokladu tvrdé napájecí sítě (konstantní hodnota primárního napětí) a až v dalším kroku uvažujeme i s vlivem úbytku primárního napětí.

Náhradní reaktanci distribuční soustavy 110 kV na straně $U_2 = 27$ kV lze vypočítat ze zkratového výkonu dle vztahu níže, podle kterého se pak náhradní reaktance jX_S odpovídající zkratovému výkonu $P_{ZKR} = 1500 - 750$ MVA pohybuje v rozmezí od $j0,5 \Omega$ do $j1 \Omega$.

$$X_S = \frac{1,1 \cdot U_2^2}{S_{ZKR}} \quad [\Omega]$$

Impedance transformátoru je:

$$\bar{Z}_T = R_T + jX_T = \frac{P_{Cu}}{I^2} + j \frac{\Delta U_2^2 \cdot u_{k\%}}{P_T \cdot 100} \quad [\Omega]$$

ΔP_{Cu} – ztráty v mědi transformátoru [W]

R_T – redukovaný činný odpor [Ω]

X_T – redukovaná reaktance transformátoru [Ω]

U_2 – sekundární napětí [V]

$u_{k\%}$ – napětí transformátoru nakrátko

P_T – jmenovitý výkon transformátoru

Impedance trakčního vedení se skládá z rezistance a reaktance vedení.

$$\bar{Z}_V = R_V + jX_V$$

Pro výpočet zkratu na konci vedení je nutné dosadit parametry vedení na jeden kilometr a násobit je maximální délkou vedení

$$\bar{Z}_V = R_0 \cdot L_{\max} + jX_0 \cdot L_{\max}$$

Celková impedance obvodu pak bude odpovídat následujícímu vztahu.

$$\bar{Z}_{\max} = R_V + j(X_S + X_T + X_V)$$

Za předpokladu tvrdé distribuční sítě je možné vztah zredukovat.

$$\bar{Z}_{\max} = R_V + j(X_T + X_V)$$

Z výše uvedených předpokladů pak vyplývá vztah pro minimální zkratový proud pro konstantní hodnotu primárního napětí z tvrdé distribuční sítě.

$$I_{Z \min} = \frac{U_2}{\sqrt{R_V^2 + (X_T + X_V)^2}}$$

Dále lze uvažovat s poklesem napětí v distribuční síti o 10 %, přičemž se počítá s největší možnou impedancí obvodu.

$$I_{Z \min} = \frac{0,9 \cdot U_2}{\sqrt{R_V^2 + (X_T + X_V + X_S)^2}}$$

Minimální zkratový proud má význam při nastavování nadproudových ochran

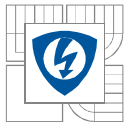
Maximální provozní proud je omezen oteplením vodičů a zatížitelností vypínače v napájecí stanici. Musí platit, že maximální provozní proud je menší než minimální zkratový proud.

Maximální zkratový proud je důležitý při dimenzování zařízení napájecích stanic.

$$I_{Z \max} = \frac{1,05 \cdot U_2}{Z_{\min}}$$

Impedance Z_{\min} je argumentem komplexně sdružené impedance \bar{Z}_{\min} , přičemž je tato komplexně sdružená impedance dána následujícím vztahem.

$$\bar{Z}_{\min} = R_T + j(X_S + X_T)$$

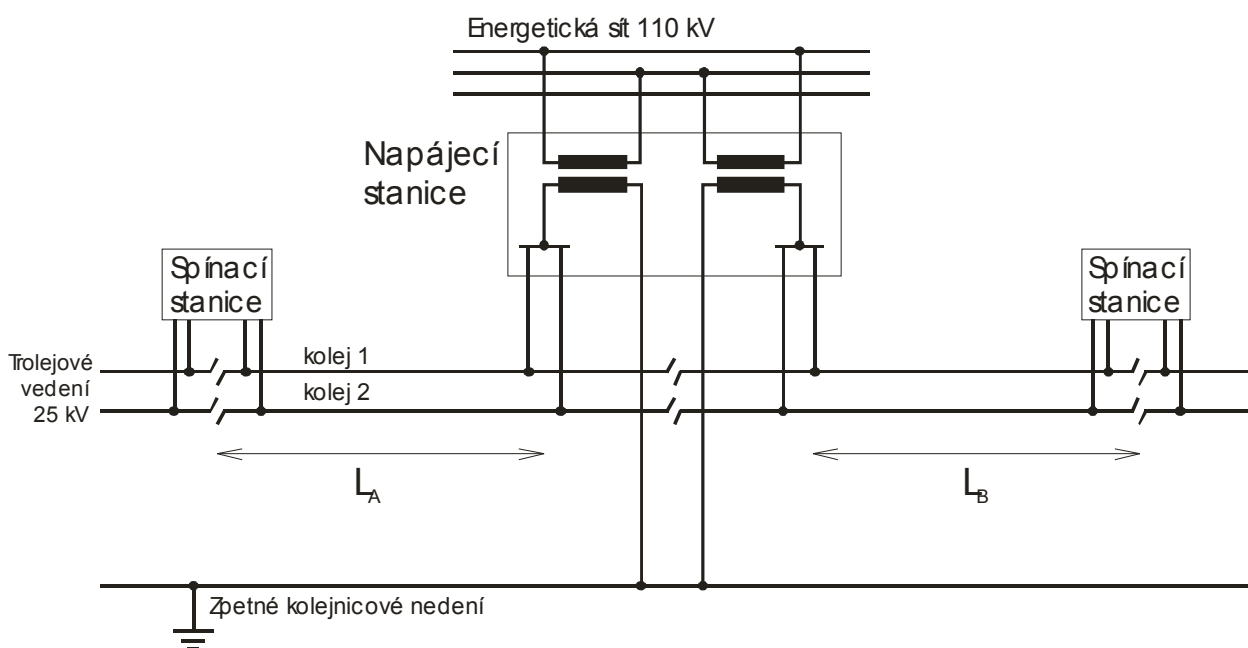


Z předpokladů uvedených výše je nyní možné vyjádřit celý vztah pro maximální zkratový proud.

$$I_{Z \max} = \frac{1,05 \cdot U_2}{\sqrt{R_T^2 + (X_S + X_T)^2}}$$

9 Návrh rozváděče pro trakční napájecí stanici

Předmětem návrhu je napájecí stanice vzdálené od spínacích stanic 22 km a 20,3 km. Napájena je dvoukolejná trať bez výraznějšího převýšení se souměrným zatížením obou kolejí. Trakční soustava je tvořena vodiči 100 Cu + 50 Bz se změřenou impedancí $Z_k = (0,112 + 0,271j) \Omega$. Roční dopravní tok není vyšší než $70 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$ a zkratový výkon nadřazené sítě je 1500 MVA.



Obr. 17 Jednoduché schéma zadání

$$L_A = 22 \text{ km}$$

$$D_{\max} = 70 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$$

$$L_B = 20,3 \text{ km}$$

$$S_{ZKR} = 1500 \text{ MVA}$$

Vzhledem k daným parametrům je třeba vybavit napájecí stanici následujícím typem trakčního transformátoru s níže danými parametry.

primární napětí	110 kV $\pm 8 \cdot 2 \%$, 50 Hz
sekundární napětí naprázdno	27 kV, 50 Hz
jmenovitý trvalý výkon s přirozeným chlazením	10 MVA
jmenovitý trvalý výkon se zesíleným chlazením	13,5 MVA
napětí nakrátko	13 % $\pm 10 \%$

Výpočet zkratových proudů v trakčním vedení je obdobného charakteru jako v běžných energetických sítích. Výpočty jsou provedeny pro místa nejvzdálenější od napájecí stanice a v její těsné blízkosti. Vliv impedance kabelového vedení spojujícího napájecí stanici a trakční vedení se zanedbává, protože má délku pouze několik desítek metrů. Ohmický odpor napájecí soustavy se také běžně zanedbává, takže impedanci zkratového obvodu tvoří pouze reaktance napájecí soustavy X_S respektující nedokonalou tvrdost sítě, jejíž napětí při zkratu poklesne. Dále je součástí impedance zkratového obvodu reaktance trakčního transformátoru X_{TR} a impedance trakčního vedení Z_{TV} . Ohmický odpor transformátoru se rovněž zanedbává.

Náhradní reaktance soustavy

$$X_{S110} = \frac{U_{110}^2}{S_{ZKR}} = \frac{110000^2}{1500 \cdot 10^6} = 8,07 \, \Omega$$

Přepočet reaktance soustavy na sekundární napětí transformátoru

$$X_{S27} = X_{S110} \cdot \left(\frac{U_{27}}{U_{110}} \right)^2 = 8,07 \cdot \left(\frac{27000}{110000} \right)^2 = 0,486 \, \Omega$$

Dále je zohledněno jednofázové zapojení trakčního transformátoru

$$X'_S = 2 \cdot X_{S27} = 2 \cdot 0,486 = 0,972 \, \Omega$$

Reaktance transformátoru s přirozeným chlazením

$$X_{TR} = u_{K\%} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{U_{NTR}^2}{S_{NTR}} = 12,5 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{27000^2}{10000000} = 9,113 \, \Omega$$

Reaktance transformátoru se zesíleným chlazením

$$X_{TR+} = u_{K\%} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{U_{NTR}^2}{S_{NTR}} = 12,5 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{27000^2}{13500000} = 6,75 \, \Omega$$

Impedance trakčního vedení o délce 22 km

$$Z_{TV22} = Z_K \cdot L_A = (0,14 + j0,26) \cdot 22 = (3,08 + j5,72) \, \Omega$$

Impedance trakčního vedení o délce 20,3 km

$$Z_{TV20,3} = Z_K \cdot L_A = (0,14 + j0,26) \cdot 20,3 = (2,842 + j5,278) \, \Omega$$

Výpočet minimálního zkratového proudu pro traťový úsek o délce 22 km

$$Z_{C22} = R_{TV22} + j(X_{TR} + X'_S + X_{TV22}) = 3,08 + j(9,113 + 0,972 + 5,72) = (3,08 + j15,8) \, \Omega$$

$$Z_{C22} = 16,1 \angle 78,97^\circ \, \Omega$$

Při výpočtu minimálního zkratového proudu předpokládáme pokles napětí v nadřazené energetické síti v okamžiku před zkratem o 10 %.

$$I_{k \min 22} = \frac{0,9 \cdot U_{N27}}{|Z_C|} = \frac{0,9 \cdot 27000}{16,1} = 1509,3 \, \text{A}$$

Výpočet minimálního zkratového proudu pro traťový úsek o délce 20,3 km

$$Z_{C20,3} = R_{TV20,3} + j(X_{TR} + X'_S + X_{TV20,3}) = 2,842 + j(9,113 + 0,972 + 5,278) = (2,842 + j15,36) \, \Omega$$

$$Z_{C22} = 15,6 \angle 79,52^\circ \, \Omega$$

Při výpočtu minimálního zkratového proudu předpokládáme pokles napětí v nadřazené energetické síti v okamžiku před zkratem o 10 %.

$$I_{k \min 20,3} = \frac{0,9 \cdot U_{N27}}{|Z_C|} = \frac{0,9 \cdot 27000}{16,1} = 1557,69 \, \text{A}$$

Výpočet maximálního zkratového proudu

Při tomto výpočtu je počítáno s minimální hodnotou celkové impedance zkratové soustavy. To znamená, že je počítáno s reaktancí trakčního transformátoru při vyšším výkonu se zesíleným chlazením a neuvažuje se s impedancí trakčního vedení.

$$Z_{C \min} = (X_{TR} + X'_S) = (6,75 + 0,972) = 7,722 \, \Omega$$

$$I_{k \max} = \frac{1,05 \cdot U_{N27}}{|Z_{C \min}|} = \frac{1,05 \cdot 27000}{7,722} = 3671,33 \, \text{A}$$

Z velkých hodnot úhlu maximálních impedancí plyne, že zkratový proud má výrazně induktivní charakter. Při příčném sepnutí spínací stanice každým z napáječů traťového úseku protéká poloviční hodnota zkratového proudu. Při rozepnutí spínací stanici napájí zkrat pouze napáječ N2 a pro výpočet minimálního zkratového proudu by se použila hodnota měrné impedance pro jednu kolej dvoukolejné trati, s druhou kolejí bez proudu. Při zkratu jedné větve v těsné blízkosti napájecí stanice a s příčným sepnutím spínací stanice je třeba pro výpočet proudu tekoucím napáječem N1 použít hodnotu měrné impedance pro jednu kolej dvoukolejné trati, přičemž druhou kolejí teče proud stejné velikosti ale opačného směru.

Pro nastavení nadproudové ochrany v napáječích nebo ve spínacích stanicích musí platit následující nerovnice.

$$(1,1 \sim 1,2) \cdot I_{p \max} \leq I_{\text{nastavované}} \leq \frac{I_{k \min}}{1,3}$$

$$(1,1 \sim 1,2) \cdot 492 \leq I_{\text{nastavované}} \leq \frac{1509,3 / 2}{1,3} \quad \text{pro vedení o délce 22 km}$$

$$(1,1 \sim 1,2) \cdot 492 \leq I_{\text{nastavované}} \leq \frac{1557,69 / 2}{1,3} \quad \text{pro vedení o délce 20,3 km}$$

Podmínky obou nerovnic jsou splněny a nadproudové ochrany je možné nastavit

v rozmezí 541,2 A až 580,5 A pro vedení o délce 22 km a pro vedení o délce 20,3 km je nastavení možné v rozmezí 541,2 A až 599,11 A při násobení maximálního provozního proudu hodnotou 1,1. Pokud by nebylo možné danou nerovnici dodržet, bylo by třeba zvolit speciální impedance ochranu, která je schopna rozlišit v určitém rozsahu zkratový proud od proudu provozního na základě jiného fázového posunutí.

Výpočet maximálního úbytku napětí

Výpočet maximálního úbytku napětí je proveden pro traťový úsek o délce 22 km, protože v úseku dlouhém 20,3 km bude maximální úbytek napětí zákonitě nižší. Ve výpočtech se uvažuje měrnou impedancí pro jednu kolej dvoukolejné trati s vedením druhé koleje bez proudu. Jelikož odběr maximálního provozního proudu na konci vedení jediným spotřebičem je málo pravděpodobný, byl maximální úbytek napětí spočítán i pro vedení rovnoměrně zatížené.

Impedance trakční sestavy

$$Z_{TV} = Z_K \cdot L_A = (0,25 + j0,4) \cdot 22 = (5,5 + j8,8) \, \Omega$$

Maximální proud vedením při vykompenzovaném účinníku $\cos\varphi = 0,95$

$$I_{\max} = I_{p\max} \cdot (\cos\varphi + j\sin\varphi) = (467,4 + j153,63) \, \text{A}$$

Maximální úbytek napětí pro jediný odběr na konci vedení ($c_n = 1$)

$$\Delta U_{\max} = c_n \cdot I_{\max} \cdot Z_{TV} = 1 \cdot (467,4 + j153,63) \cdot (5,5 + j8,8) = (1218,76 + j4958,01) \, \text{V}$$

$$\Delta U_{\max} = 5105,68 \angle 76,19^\circ \, \text{V}$$

Maximální úbytek napětí pro rovnoměrně zatížené vedení ($c_n = 0,5$)

$$\Delta U_{\max} = c_n \cdot I_{\max} \cdot Z_{TV} = 0,5 \cdot (467,4 + j153,63) \cdot (5,5 + j8,8) = (609,38 + j2479,04) \, \text{V}$$

$$\Delta U_{\max} = 2552,84 \angle 76,19^\circ \, \text{V}$$

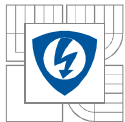
Obě hodnoty maximálního úbytku napětí jsou v normě.

Kontrola oteplení vedení elektrickým proudem

Při kontrole vedení na oteplení proudem není nutné provádět výpočty. Stačí porovnat maximální provozní proud napájecí stanice s maximálním normativním stanoveným proudem pro danou soustavu. Pro danou soustavu je maximální proud roven hodnotě 780 A, přičemž maximální provozní proud napájecí stanice je 492 A. Oteplení vedení je tedy v normě.

Vybavení rozvodného zařízení

Pro rozvodnu je zvolen typ kovově krytého, vzduchem izolovaného rozváděče řady SAxx, který byl v textu již popsán, jehož výrobcem je OHL ŽS, a.s., Závod 20, divize Technologie. Stejný typ rozváděče, včetně přístrojového vybavení, je zvolen i pro obě spínací stanice. Jako vypínač rozváděče je zvolen vypínač firmy SERW s maximálním jmenovitým provozním



proudem 1250 A. Jednopolové schéma rozváděče, jeho dispozice včetně izometrického pohledu jsou součástí přílohy. Pro dvoukolejnou trať byl zvolen čtyřúhelníkový typ spínací stanice, jejíž jednopolové schéma je rovněž součástí přílohy.

10 Závěr

V této práci byla rozvedena problematika jednofázového napájení trakčního vedení o napětíové hladině 25 kV, 50 Hz AC. V textu jsou uvedeny jmenovité a mezní kvalitativní znaky provozu dané trakční soustavy.

Dále jsou rozebrány nepříznivé vlivy způsobené jednofázovým odběrem z třífázové nadřazené distribuční sítě, užitím hnacích vozidel se stejnosměrnými motory a charakteristickým zatížením trakční soustavy. U daných nepříznivých vlivů jsou uvedeny způsoby jejich kompenzace. Následně jsou popsány dílčí části trakčních napájecích stanic, také stanic spínacích a jejich stavebně konstrukční provedení.

V bakalářské práci je podrobněji popsána konstrukce kovově krytého, vzduchem izolovaného rozváděče s vakuovým vypínačem, jakožto dnes často používaného řešení napájení drážní trakce. Je zde uveden i průřez současnou nabídkou těchto zařízení. Jelikož se na daný typ rozváděčů vztahuje přibližně 60 technických norem, předpisů a nařízení, je zde rozebráno, nebo uvedeno pouze několik nejdůležitějších.

Ke konci práce byly popsány elektrické parametry jednofázového trakčního vedení 25 kV AC, 50 Hz včetně postupů výpočtů potřebný pro návrh rozváděče pro dané vedení. V posledním úseku práce jsou pro konkrétní reálné zadání uvedeny výpočty, doplněné o výkresy navrženého rozváděče, které jsou uvedeny v přílohách.

11 Použité informační zdroje

- [1] Santarius, P., Elektrické stanice a vedení
Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1990, 214 stran, 1. Vydání
- [2] Jansa, F., Elektrická trakční zařízení
Bratislava: Alfa, 1988, 204 stran, 2. Vydání
- [3] Matouch, Z., Princ, J., Trakční energetika: učebnice pro 4. ročník středních průmyslových škol, obor 37-42-6 Elektrická trakce a kolejová vozidla v železniční dopravě
Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1974, 627 stran, 1. Vydání
- [4] Heřman, J., Příručka silnoproudé elektrotechniky
Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 1028 stran, 2. Vydání
- [5] Svoboda, J., Trakční vedení
Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1979, 307 stran, 1. Vydání
- [6] Krychtálek, Z., Elektrické stanice
Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 413 stran, 1. Vydání
- [7] Novotný, V., Vávra, Z., Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí: vysokoškolská příručka pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických
Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 270 stran, 1. Vydání
- [8] Horák, H., Napájení elektrizovaných železnic (Elektroenergetika)
Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1989, 216 stran
- [9] Hlava, K, Toušek, L, Dozer, J, Richter, J, Kabrhel, I, Boček, V, Tuháčková, J, Cengel, L, Kramerius, B, Kudrn, K,
Zpětné vlivy elektrických trakčních zařízení na nadřazenou elektrizační soustavu
Plzeň: Dům techniky ČSVTS Plzeň, 1987, 126 stran
- [10] Schneider electric, Sortiment nabídky [online]
WWW: <http://www.schneider-electric.cz>
- [11] ABB, Sortiment nabídky [online]
WWW: www.abb.com/railway
- [12] Siemens, Sortiment nabídky [online]
WWW: www.siemens.com/mobility/electrification
- [13] Areva, Sortiment nabídky [online]
WWW: www.areva.com